修士論文
ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラ
データ収集システムの構築

東京工業大学大学院 理工学研究科 基礎物理学専攻
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 高エネルギー天文学研究系
堂谷研究室　藤永 貴久

2010 年 2 月 12 日

Abstract

本研究では、次期X線天文衛星 ASTRO-H 塔載の X 線 CCD カメラの開発のために、その試作モデルを利用し SpaceWire ネットワークを介してデジタルデータを取得するシステムを構築した。

X 線 CCD カメラは撮像と分光が同時に可能なため、X 線望遠鏡の標準的な焦点面検出器として幅広く用いられている。2014 年打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星にも、軟 X 線撮像検出器 (SXI: Soft X-ray Imager) として塔載される。SXI は大面積 CCD を 4 枚モザイク状に並べ、X 線 CCD 検出器としては過去最大の視野を実現する。

従来、衛星搭載の機器同士は、独自仕様のネットワークで結ばれていたが、ASTRO-H から SpaceWire が本格的に採用される。SpaceWire は衛星内の汎用ネットワークアーキテクチャで、ESA、JAXA、NASA などが協同して策定を進めている。ASTRO-H では各検出器のデジタル回路に共通設計の基板を採用し、SpaceWire によって開発期間の短縮やコスト削減がもたらされる。したがって、SXI の開発に当っても、SpaceWire を用いたデータ取得系が必要になる。

そこで私は SpaceWire 通信によって CCD のデジタルデータを収集するソフトウェア “sxiSpWdaq” を開発した。開発に当っては、CCD の読み出し回路の試作モデル BBM (Bread Board Model) を利用した。BBM は (1) 駆動と読み出しに必要なクロックパターンを供給する Sequencer、(2) Sequencer からのタイミングをもとに駆動信号を CCD へ供給するドライバーボード、(3) CCD からの出力の AD 変換前半処理を行うビデオボード、(4) AD 変換後半処理と SpaceWire ネットワークの窓口となる DE I/F から成る。また、BBM を動作させるために SpaceWire インターフェイスをもつコンピュータ SpaceCube と、POSIX OS コンピュータを利用した。

sxiSpWdaq は、POSIX OS コンピュータ上で動作し、CCD の露光開始の指示と DE I/F からのデータ収集を繰り返し行う。DE I/F からのデータは、SpaceCube での TCP へのプロトコル変換、Ethernet 経由での POSIX OS コンピュータへの転送を経て、FITS 形式のイメージファイルとして保存される。コーディングに当っては、既開発の　SpaceWire/RMAP Library を利用した。sxiSpWdaq は 24 時間以上安定に動作し、データ転送速度は 4.4 Mbps に達した。

さらに、真空・冷却系を整備し、実際にX線CCDを接続して撮像実験を行った。CCD 素子を -15°C に冷却し、^{55}Fe からの X 線を照射して撮像を行ったところ、撮像システムとして機能することが確認できた。取得した FITS ファイルからX線イベントを抽出し、スペクトルを作成したところ 5.9 keV でのエネルギー分解能は 220 eV であった。

最後に、構築したデータ収集系と BBM システムの性能について考察し、今後の課題について整理した。

Abstract

A data acquisition system is developed for the X-ray CCD camera on board the ASTRO-H satellite. The system, which uses the bread board model of the camera and adopts the SpaceWire network for data transmission, is indispensable for the development of the X-ray CCD camera.

An X-ray CCD camera affords imaging and spectroscopic capability simultaneously, and is widely used as a standard focal plane detector of an X-ray telescope. Soft X-ray Imager (SXI), which will be installed on the Japanese ASTRO-H satellite to be launched in 2014, is one of such X-ray CCD cameras. SXI is equipped with a 2×2 CCD array, and offers the largest field of view so far among the X-ray CCD cameras.

A satellite network was usually designed individually. However, a standard network architecture called SpaceWire is being developed through the collaboration of ESA, JAXA, and NASA, which will be adopted by ASTRO-H for the first time in Japan in full-scale. Spacewire is expected to reduce the cost and time in developing satellites. Thus, a data acquisition system using SpaceWire is also required for the development of SXI.

For this purpose, I developed the data acquisition software "sxiSpWdaq", which acquires the CCD data through SpaceWire. In this development, a bread board model (BBM) of the SXI circuit boards was used. The SXI BBM consists of (1) Sequencer to send timing clocks to other circuit boards, (2) Driver Board to provide analogue signal to CCD, (3) Video Board to convert the CCD output signal to digital signal and (4) DE I/F to process the CCD digital signal and to interface the SpaceWire network. In addition to the BBM, a SpaceCube computer, which has SpaceWire interface, and a POSIX OS computer were also used.

"sxiSpWdaq" works on the POSIX computer. In the acquisition system, the POSIX OS computer communicates with the SpaceCube with TCP/IP through Ethernet and the SpaceCube works as a protocol converter. The software controls the CCD exposure and the acquisition of the stored data in SDRAM on DE I/F, and repeat them arbitrary times. To code this software, "SpaceWire/RMAP Library" is used. The acquired data are finally stored on POSIX OS as a FITS format image file. A running test showed that the data acquisition was stable for more than 24 hours and the mean transfer speed was 4.4 Mbps.

Furthermore, an operation test to read an X-ray CCD combining the whole BBM and the data acquisition system was carried out after preparing the vacuum and the cooling system. I verified its operation as an X-ray imaging system with the CCD temperature of -15°C and an X-ray source of ^{55}Fe. The spectral analysis showed the energy resolusion of 220 eV at 5.9 keV after the event extraction of obtained FITS files.

Finally, performance of the developed data acquisition system including the whole BBM, and future tasks are discussed.

Contents

第 1 章　X 線天文学とは **1**
1.1 X 線天文学 . . . 1
1.1.1 X 線 . . . 1
1.1.2 X 線の放射機構 . . . 1
1.1.3 これまでの X 線天文学 . . . 2
1.1.4 今後の X 線天文学 . . . 3
1.2 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H . . . 3
1.3 X 線と物質の相互作用 . . . 5
1.3.1 相互作用の諸過程 . . . 5
1.3.2 X 線の減衰 . . . 8

第 2 章　X 線 CCD 検出器 **9**
2.1 X 線 CCD 検出器の構造 . . . 9
2.1.1 空乏層と中性領域 . . . 9
2.1.2 表面チャネル型 CCD と埋め込みチャネル型 CCD . . . 9
2.1.3 チャネルストップ . . . 10
2.1.4 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD . . . 10
2.2 検出原理 . . . 11
2.2.1 X 線と CCD の相互作用 . . . 11
2.2.2 光電吸収 . . . 12
2.2.3 電子雲の生成 . . . 12
2.2.4 空乏層中での電子雲の移動 . . . 13
2.3 電荷転送と読み出し . . . 16
2.3.1 転送方式 . . . 16
2.3.2 転送方法 . . . 17
2.3.3 Overclocking . . . 18
2.3.4 電荷-電圧変換 . . . 19
2.3.5 波高値の取得 . . . 21
2.4 イベント抽出 . . . 21
2.4.1 Grade 判定法 . . . 22
2.5 性能の指標 . . . 24
2.5.1 エネルギー分解能 . . . 24
2.5.2 量子検出効率 . . . 24

第 3 章　ASTRO-H SXI **25**
3.1 SXI システムの全体構成 . . . 25
3.1.1 SXI-S . . . 25

3.1.2 SXI-PE . . . 26
3.1.3 SXI-DE . . . 27
3.1.4 SXI-CD . . . 27
3.1.5 SXI-MXS . . . 28
3.2 SXI の要求性能 . . . 28

第 4 章 衛星内の次世代情報処理系 SpaceWire 31
4.1 SpaceWire とは . . . 31
4.1.1 SpaceWire プロトコル . . . 31
4.1.2 RMAP . . . 32
4.1.3 SpaceWire を使った衛星計画 . . . 33
4.2 SpaceWire 通信のためのハードウェア . . . 34
4.2.1 SpaceCube . . . 34
4.2.2 Universal SpW Board . . . 34
4.3 SpaceWire 通信のためのソフトウェア . . . 35
4.4 SpaceWire を利用した検出器の開発 . . . 36

第 5 章 SXI BBM デジタルデータ収集系の開発 37
5.1 SXI BBM の構成 . . . 37
5.1.1 Driver Board . . . 37
5.1.2 Video Board . . . 38
5.1.3 DE I/F . . . 39
5.1.4 Sequencer . . . 41
5.1.5 CCD 素子 . . . 41
5.1.6 Head 基板 . . . 41
5.1.7 SpaceCube 及び POSIX OS コンピュータ . . . 42
5.2 データ収集システム構築のロードマップ . . . 42
5.3 DE I/F – SpC 間の RMAP/SpaceWire 通信 . . . 45
5.3.1 通信に必要な設定 . . . 45
5.3.2 パケットデータの信頼性 . . . 45
5.3.3 データ転送速度の測定と改善 . . . 45
5.4 収集データのイメージファイル化 . . . 47
5.4.1 FITS 形式 . . . 47
5.4.2 FITS 形式のファイルを読み書きするためのライブラリ . . . 47
5.4.3 バッファマネージャ NOVA . . . 47
5.4.4 ファイル化作成ソフト “nova2fits” の構築 . . . 48
5.5 PCODE を利用したデータ収集 . . . 49
5.5.1 PCODE の検証 (1) エンディアン . . . 49
5.5.2 PCODE の検証 (2) 得られる PCODE の実際 . . . 50
5.5.3 nova2fits の PCODE 判定機能拡張 . . . 53
5.6 SXI データ収集ソフト “sxiSpWdaq” の構築 . . . 54
5.7 第 5 章のまとめ . . . 56

第 6 章　SXI BBM の性能評価 **57**
6.1 アナログ回路の動作検証 57
6.1.1 Driver Board 57
6.1.2 Video Board 57
6.2 撮像試験のセットアップ 61
6.2.1 真空系および照射線源 61
6.2.2 冷却系 61
6.2.3 ASIC プリアンプオフセット値の最適化 62
6.3 撮像試験の結果 63
6.3.1 イメージ 63
6.3.2 スペクトル 63
6.4 SXI BBM システムの性能 67
6.5 第 6 章 のまとめ 68

第 7 章　議論 **71**
7.1 デジタルデータ収集系の性能と問題点 71
7.1.1 データ転送速度 71
7.1.2 データ収集ソフト sxiSpWdaq の問題点 71
7.1.3 PCODE 判定機能 72
7.1.4 DE I/F の問題点 72
7.2 SXI BBM システムの性能と問題点 72
7.2.1 エネルギー分解能の考察 73
7.2.2 撮像システム全般の今後の課題 73

第 8 章　まとめ **75**

付 録 A　rmaphongo の実行例 **77**

付 録 B　Head 基板駆動信号の波形 **81**

付 録 C　白金抵抗温度計の較正 **83**

List of Figures

1.1 各電磁波の波長と大気の透過率の関係 2
1.2 ASTRO-H のイメージ 5
1.3 原子番号と蛍光収率の関係 6
1.4 Compton 散乱 7
1.5 入射光子エネルギーと散乱光子、反跳電子のエネルギーの関係 7
1.6 シリコンに対する X 線の各相互作用の断面積 8

2.1 X 線 CCD 検出器の断面図 10
2.2 CCD の断面構造のポテンシャル 11
2.3 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD の検出効率 12
2.4 電子雲のドリフトと熱拡散 14
2.5 Full Frame Transfer 型の転送方式の模式図 16
2.6 [Frame Transfer 型の転送方式の模式図 17
2.7 [Interline Transfer 型の転送方式の模式図 17
2.8 Frame Transfer 型 CCD における電荷転送の時系列 18
2.9 二相クロックと三相クロックによる電荷転送の模式図 19
2.10 X 線 CCD 検出器の電荷検出機構 (FDA) 20
2.11 CCD の出力波形 20
2.12 相関多重サンプリング 21
2.13 積分方式によるサンプリング 22
2.14 Grade 判定法による Grade の定義 23

3.1 SXI 各部の位置関係 26
3.2 SXI 駆動・読み出し回路系のブロック図 27
3.3 SXI システム全体の構造図 28
3.4 SXI で用いる CCD 素子 Pch NeXT4 の量子効率 29
3.5 SXI で用いる CCD 素子のプロトタイプ 29
3.6 OBL の構造と紫外線透過率 30

4.1 SpaceWire ケーブルとピン配置 32
4.2 DS エンコーディング 32
4.3 SpaceWire ネットワークの例 33
4.4 RMAP パケットによるコマンドとリプライの概観 34
4.5 SpaceCube 35
4.6 Universal SpW Board 35
4.7 Universal SpW Board の回路ブロック図 36
4.8 SpaceWire を利用した検出器開発の簡略図 36

5.1 SXI BBM の構成 . . . 38
5.2 Driver Board の写真 . . . 39
5.3 Video Board の写真 . . . 39
5.4 DE I/F User FPGA のブロックダイアグラム . . . 41
5.5 Nch-mini CCD . . . 42
5.6 デジタルデータ収集系全体の構想 . . . 43
5.7 データ収集ソフトに求められる処理フロー . . . 44
5.8 SpaceCube をプロトコルブリッジとして使うときの概念図 . . . 46
5.9 NOVA の概念図 . . . 48
5.10 nova2fits 動作検証の結果生成された FITS イメージ . . . 49
5.11 標準的な Sequencer ロジックが DE I/F へ与える 1 フレームあたりの PCODE . . . 50
5.12 デジタルデータ収集系でのエンディアンの関係 . . . 50
5.13 Sequencer ロジックで PCODE を生成し DE I/F のデシメーションフィルタを動作させたとき SDRAM に保存された PCODE . . . 52
5.14 Sequencer ロジックが DE I/F へ与える 1 フレームあたりの PCODE (ロジック改修後) 53
5.15 nova2fits に PCODE 判定機能を加えたときの PCODE イメージ . . . 54
5.16 完成したデータ収集ソフトのフローチャート . . . 55
5.17 完成したデータ収集系の全体図 . . . 56

6.1 ビデオボード動作検証時のセットアップ . . . 59
6.2 CCD 出力模擬信号の例 . . . 60
6.3 CCD 出力の模擬信号に対する応答 . . . 60
6.4 撮像実験全体のセットアップ . . . 61
6.5 銅製治具の構造の概観 . . . 62
6.6 真空槽内の写真 . . . 63
6.7 波高値の生イメージ . . . 64
6.8 スペクトル解析のアクティビティー図 . . . 65
6.9 HOC のヒストグラム . . . 66
6.10 oddhigh の Grade 0 ヒストグラム . . . 67
6.11 oddlow の Grade 0 ヒストグラム . . . 67
6.12 ASIC モジュレータごとの Grade 0 のヒストグラム . . . 68

B.1 Head 基板上での駆動信号の波形 . . . 82

C.1 白金抵抗温度計較正結果 . . . 83

List of Tables

3.1 SXI の要求性能 30

4.1 SpaceCube のスペック 35
4.2 Universal SpW Board のスペック 35

5.1 Driver Board が生成する駆動信号 39
5.2 PCODE の定義とその値 42
5.3 Nch mini CCD の主なスペック 42
5.4 SpaceWire データ転送速度の変遷 47

6.1 DA コンバータ出力の予想値と測定値 58
6.2 ドライバーボードのテストポイントでの出力の予想値と測定値 59
6.3 HOC ヒストグラムのフィッティング結果 66
6.4 Grade 0 のヒストグラムのフィッティング結果 68
6.5 ASIC のモジュレータごとに統合したヒストグラムのフィッティング結果 69

B.1 Head 基板上での駆動電圧 81

C.1 白金抵抗温度計較正フィッティング結果 83

第1章　X線天文学とは

X線天文学は、1962年にB. Rossiらのロケット実験によって全天で最も明るいX線源であるSco X-1が発見されたことに始まる。X線天文学の発展はX線検出器の進歩に支えられてきた。ここでは、X線天文学の概要を述べる。

1.1　X線天文学

地球大気はX線を透過しないので (図 1.1)、天体からのX線を観測するためには気球、ロケット、人工衛星などの飛翔体を用いて大気圏外にX線検出器を持ち出す必要がある。最初の本格的なX線天文衛星であった1970年のUhuru衛星以来、人工衛星を用いたX線天体の観測が数多く行なわれてきた。

1.1.1　X線

X線は紫外線とガンマ線の中間のエネルギーをもつ電磁波の総称で、原子を取り巻く電子の軌道遷移時に専らやりとりされる電磁波である。宇宙観測の分野では、エネルギーが 0.1 keV から 100 keV 程度の電磁波をX線と呼ぶことが多い。

エネルギー E、波長 λ、温度 T の関係式は

$$E/\mathrm{keV} = \frac{1.24}{\lambda/\mathrm{nm}} \tag{1.1}$$

$$E/\mathrm{eV} = k_\mathrm{B}T/\mathrm{K} \tag{1.2}$$

と表される。ここで、$k_\mathrm{B} = 8.61735 \times 10^{-5}$ eV/K はBoltzmann定数である。

1.1.2　X線の放射機構

X線を放射する天体の種類は多岐に及ぶが、その放射機構は大きく二つに分類することができる。熱平衡にある物質からの放射 (熱的放射) と、熱平衡にない物質からの放射 (非熱的放射) である。

- 熱的放射
  熱的放射には、放射体の温度に応じて特に強い放射を出したり急激に強度が変化する特徴的な波長帯が存在する。X線領域で強い放射をするのは 10^{7-9} K 程度の超高温物質である。熱的なX線スペクトルをみせる天体は光学的に薄い高温プラズマと光学的に厚い物質に分けられる。光学的に薄い高温プラズマは、熱制動放射による連続成分とプラズマ内のイオン化した元素からの輝線で特徴づけられる強いX線を放射する。光学的に厚い物質からの放射は黒体放射で表すことができ、具体的には連星系をなすブラックホールや中性子星のまわりに形成される降着円盤、あるいは中性子表面からのX線放射がある。

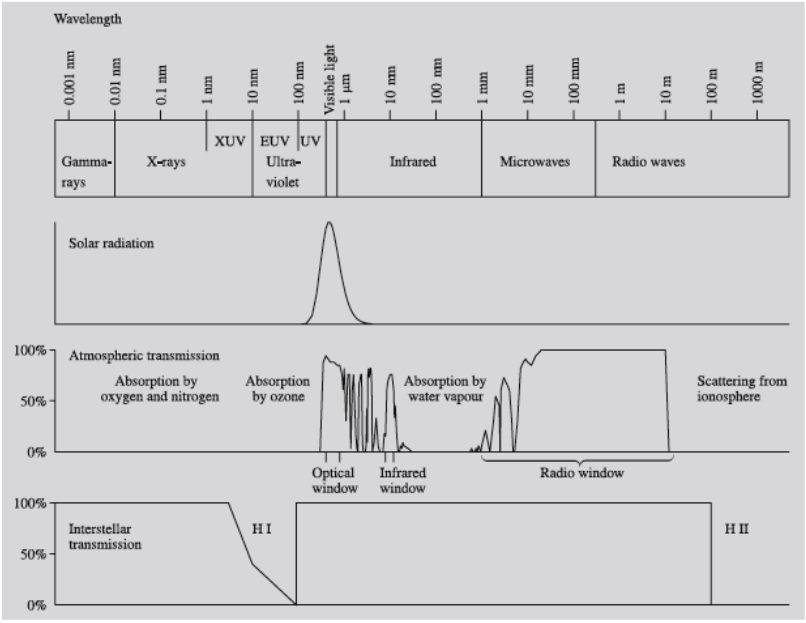

図 1.1: 各電磁波の波長と大気の透過率（大気圏外からやってくる電磁波の到達高度）の関係 [1]

- 非熱的放射
  非熱的な放射は、一般的には特徴的な波長帯を持たず、輝線・吸収端といった構造もない。非熱的な X 線を放射するには、熱以外の電子の加速機構が必要である。代表的なものとしてシンクロトロン放射と逆コンプトン散乱がある。シンクロトロン放射は、相対論的な電子が磁場中で加速度運動することによる放射である。逆コンプトン散乱は高速で運動する電子が光子に衝突し、光子のエネルギーをたたきあげる現象である。これらの現象は、高エネルギー電子のエネルギースペクトルがベキ関数で表される場合、放射のスペクトルもベキ関数で表される。

1.1.3　これまでの X 線天文学

これまでの X 線観測によって、さまざまな発見がもたらされた。ここでは主な観測対象についてその概要を述べる。

- 超新星残骸
  恒星はその進化の過程で超新星爆発を起こす。その痕跡は何万年にも渡って残り、超新星残骸と呼ばれる。宇宙の化学的進化は、安定な鉄までは恒星の中での核反応で行われ、さらに重い元素は超新星爆発で生成され宇宙空間に放出される。超新星残骸の研究によって宇宙の化学的な進化を調べることができる。

- X 線連星系
  X 線連星系は中性子星もしくはブラックホールと恒星の連星のことである。相手の恒星の質量により大質量 X 線連星系と低質量 X 線連星系に分類される。大質量 X 線連星系では強い磁場をもち、伴星の年齢が若く (10^7 年以下)、若い種族の天体といえる。大質量 X 線連星系のほとんどは X 線強度が周期的に変化する X 線パルサーである。降着円盤もしくは星風からの降着流が磁力線に沿って磁極に集中し、高温ガスが形成される。中性子星の自転とともに磁極を曲げ

られ、ガスからの X 線が見え隠れすることで周期的な強度変化を起こす。X 線強度の変化は規則的であるため、中性子星のわずかな自転周期の変化も測定することが可能である。中性子星は降着物質が持ち込む角運動量によって自転周期が変化すると考えられている。一方低質量 X 線連星系では伴星は暗くて見えないほど小さく、年齢は $(5-10)\times10^9$ 年と言われている。磁場が弱いため降着物質は中性子星表面に直接到達し、中性子星表面が X 線で明るく輝くと考えられているが、低質量 X 線連星系からの X 線放射は他の geometry でも説明できるため、放射域の特定が最大の問題となっている。

- 銀河団
  銀河の集団である銀河団は、温度が数千万度に達する高温ガスで満たされており、X 線で明るく輝いている。高温ガス中の重元素の量と分布を調べることによって、これまでどのような星が生まれて死んでいったのか、さらには銀河・銀河団がどのように進化してきたのかを知ることができる。

- 活動銀河核 (Activi Galactic Nuclei: AGN)
  銀河の中心が銀河にある全ての星の明るさを足し合わせたよりも明るく輝いている銀河が存在する。このような銀河の中心核を活動銀河核と呼ぶ。これは太陽質量の 10^6-10^9 倍もの巨大ブラックホールへの質量降着がエネルギー源で、電波からガンマ線までの幅広い帯域で輝く。また相対論的ジェットを伴うものもある。X 線では、中心エネルギーに対し非対称に大きく広がった鉄輝線や電離ガスによる吸収構造等を示すスペクトル、X 線強度の時間変動が観測される。

- 宇宙 X 線背景放射 (Cosmic X-ray Background: CXB)
  CXB は宇宙のどの方向からもほぼ等方的にやってくる微弱な X 線のことであり、その起源は X 線天文学始まって以来の謎である。CXB はそれ自身が観測の対象となることもあるが、天体を観測するときにはバックグラウンドとなる。観測天体が点源の場合、この成分は角分解能を高くすることで影響を低減することができる。

1.1.4 今後の X 線天文学

宇宙で主に熱的放射をする天体の温度は一般的に数 keV のオーダーである。これまでの観測で、活動銀河核や超新星残骸などから非熱的な成分が見つかっており、宇宙線の加速の現場ではないかと指摘されている。宇宙において、高エネルギー粒子の数は少ないものの、持っている総エネルギー (個数 × 個々のエネルギー) は宇宙全体のエネルギーの無視できない割合を占める。宇宙の全エネルギーがどのように、またどのような物理法則によって分配されているのかを理解することは、宇宙の根本的な問題と言える。

昨年、国際宇宙ステーションで MAXI が X 線全天サーベイを開始した。さらに、2014 年打ち上げ予定の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H において、10 keV 以下の帯域でマイクロカロリメータによる高いエネルギー分解能の分光観測や、10 keV 以上の高エネルギー領域で初めて集光系による撮像分光観測ができる検出器を搭載する。これら新たな観測装置により、未解決の諸問題が解明されていくかもしれない。

1.2 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

現在、日本の 5 番目の X 線天文衛星として「すざく」が 2005 年より観測を続けている。今後も持続的に X 線観測を行うためには、新たな衛星を開発し打ち上げなければならない。次期 X 線観測ミッ

ションとして ASTRO-H が 2008 年度に正式プロジェクトとして採用され、2014 年の打ち上げを目指している。

ASTRO-H には 4 種類の検出器が搭載され、0.3 keV から 600 keV に及ぶ広帯域の X 線・軟ガンマ線を観測する。ASTRO-H では、「すざく」で実現できなかったマイクロカロリメータによる高いエネルギー分解能の観測を行うほか、10 keV 以上の硬 X 線で初の撮像観測を行い感度を飛躍的に向上させる。搭載される検出器は以下の通りである。

- 軟 X 線撮像検出器 SXI (Soft X-ray Imager)
  軟 X 線望遠鏡 (SXT: Soft X-ray Telescope) から 5.6 メートル隔てた焦点面に置かれる X 線 CCD カメラである。0.4 – 12 keV の撮像に加え、5.9 keV で 150 eV 以下のエネルギー分解能で分光する。詳細は 第 3 章で述べる。

- 軟 X 線分光検出器 SXS (Soft X-ray Spectrometer)
  これも SXI と同様に SXT の焦点面検出器であるが、こちらは 0.3 – 10 keV で高精度分光観測を行うマイクロカロリメータである。原理的には、飛来する X 線光子を吸収体の温度変化によって検出する。エネルギー分解能は吸収体の温度によって決まるため、スターリング冷凍機、ジュールトムソン冷凍機、3 段式断熱消磁冷凍機を組み合わせ、素子は 50 mK に冷却する。視野は 3 分角、角度分解能は 1.7 分角、エネルギー分解能は 7 eV を目指している。

- 硬 X 線撮像検出器 HXI (Hard X-ray Imager)
  10 keV を超えるエネルギー帯域での集光系による撮像はまだ行われていない。一方で、超新星残骸のような広がった天体の非熱的放射の解明には、硬 X 線でのイメージングが必要になる。また、X 線望遠鏡の開発進展により、数十 keV の硬 X 線帯域まで集光し検出器を小さくしてバックグラウンドを低減することが実現した。硬 X 線撮像観測に必要な要素として、高い検出効率や数 cm^2 程度の大きな面積、1 keV 程度のエネルギー分解能、数百 μm の高い位置分解能がもとめられる。これらを満たすものとしてテルル化カドミウム (CdTe) が期待されている。HXI は CdTe 半導体検出器の上に、4 段に積み重ねた Si 半導体検出器を置き 80 keV までの光子に対し検出効率の向上を図る。さらに、「すざく」搭載硬 X 線検出器 (HXD: Hard X-ray Detector) で用いられた BGO シンチレータによるアクティブシールドも搭載することで、バックグラウンドを削減し高感度観測を行う [7]。

- 軟ガンマ線検出器 SGD (Soft Gamma-ray Detector)
  硬 X 線より高いエネルギー帯域では、原子番号の小さい半導体検出器では光電吸収よりも Compton 散乱の方が確率的に多く、一方で原子番号が大きく密度の高い半導体検出器では光電吸収の断面積が大きい。そこで、原子番号の小さい Si 検出器で光子を散乱させ、散乱ガンマ線を原子番号の大きい CdTe 吸収体で捉える検出器「Si/CdTe コンプトンカメラ」が考案された。これが SGD である。SGD は 32 段のシリコンストリップ検出器と 8 段の CdTe 検出器から成る。積層構造にすることで検出効率が高くなる上、エネルギー分解能が向上する。また HXI と同様に BGO シンチレータと APD (アバランシェ・フォトダイオード) をアクティブシールドに用い、徹底的にバックグラウンドを削減する。このようにして 10 – 600 keV のガンマ線を観測する。[7]

また ASTRO-H では、機上の情報処理基盤として SpaceWire を採用する。衛星全体に SpaceWire を使うのは、大型衛星では ASTRO-H が初である。SpaceWire の詳細は 第 4 章 で述べる。

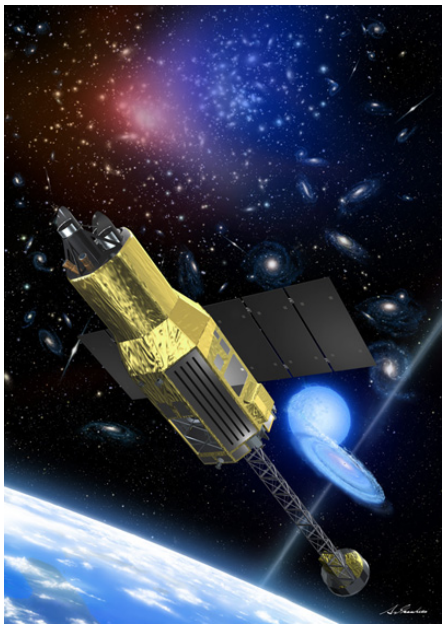

図 1.2: ASTRO-H のイメージ [8]

1.3 X 線と物質の相互作用

X 線や γ 線、すなわち高エネルギーの電磁波が物質に入射すると、光電吸収、Compton 散乱、電子対生成によって高速電子を生み出す。一般的にはこれらの相互作用を利用して X 線を検出する。ここでは X 線・γ 線の物質との相互作用の諸過程について説明する。

1.3.1 相互作用の諸過程

1. 光電吸収
   光子が物質の原子によって吸収されるのは、原子核に束縛された電子によるものであり、自由電子による吸収は起こらない。すなわち、エネルギーと運動量の保存則が成立するためには、運動量のやりとりするための第三の物体 (原子核) が存在しなければならない。入射光子のエネルギーを E_γ とすると、放出される電子 (光電子) のエネルギー E_e は

$$E_e = E_\gamma - E_b \tag{1.3}$$

   である。ここで、E_b は K, L, M, $\cdots$ 殻の結合エネルギーである。K 殻の結合エネルギーよりも大きなエネルギーを持つ光子に対しては、80 %以上が K 殻電子によるものとなる。

   光電子放出の結果として殻にできた空孔は自由電子の捕獲や原子内の他の殻の電子の再配列によって直ちに満たされる。初期状態と最終状態のエネルギー差は Auger 電子または特性 X 線の放射によって解放される。

   - Auger 電子
     光電子放出などによって通常満たされているはずの内殻の一部が空になると外殻の電子が空孔に落ち、その際放出されるエネルギーが他の外殻電子 1 個に付与され、その電子が原

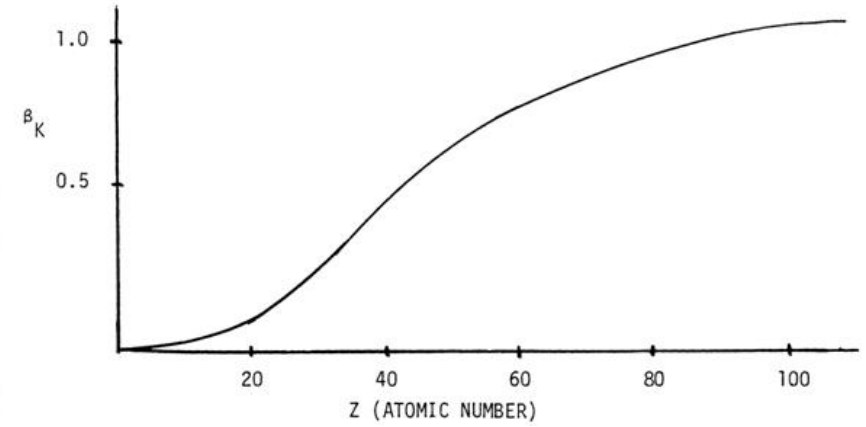

図 1.3: 原子番号 Z と蛍光収率 β_K の関係

子から放出されることがある。この電子を Auger 電子という。Auger 電子は原子の最初の励起エネルギーと電子が放出された殻の結合エネルギーの差のエネルギーを持つ。

- 特性 X 線
  励起状態から基底状態へ遷移するときに放射される X 線を特性 X 線と呼び、そのエネルギーは初期状態と最終状態エネルギーの差になる。もし K 殻に 1 個の空孔が一時的にできたとすると、その後この空孔が埋められる際に K 系列の特性 X 線が放射される。空孔を埋める電子が L 殻から来る場合には、K 殻と L 殻のエネルギー差に等しいエネルギーを持つ K_α 線が放射される。M 殻から電子が来る場合には、よりエネルギーの大きな K_β 線が放射される。K 殻の空孔を埋めた電子を供給したために生じる外側の殻の空孔はさらに外側の電子によって次々に満たされて、順次 L, M, $\cdots$ 系列の特性 X 線を放射する。

励起原子が基底状態に戻る際に特性 X 線を放射する割合を蛍光収率 (fluorescence yield) といい、原子番号 Z に依存する (図 1.3)。シリコン ($Z = 14$) の場合、蛍光収率は 5 %程度となる。

2. Compton 散乱
   自由電子によって光子が散乱される場合、あるいは光子のエネルギーが電子の結合エネルギーに比較して十分大きくなって、電子を自由電子とみなすことができるようになると、光子は電子により非弾性散乱を受ける。この場合の散乱光子のエネルギーは、運動学的な関係式から次式で与えられる。

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha\,(1 - \cos\theta)} \tag{1.4}$$

ここで、$\alpha = E_\gamma / m_e c^2$, θ は光子の散乱角である。反跳電子のエネルギー E_e は、飛び出す角度を ϕ として、

$$\begin{aligned} E_e &= E_\gamma - E_{\gamma'} \\ &= E_\gamma \frac{2\alpha\cos^2\phi}{(1+\alpha)^2 - \alpha^2\cos^2\phi} \\ &= E_\gamma \frac{\alpha(1-\cos\theta)}{1+\alpha(1-\cos\theta)} \end{aligned} \tag{1.5}$$

となる。Compton 散乱の断面積は光子のエネルギーが低くなると Thomson 散乱断面積に一致

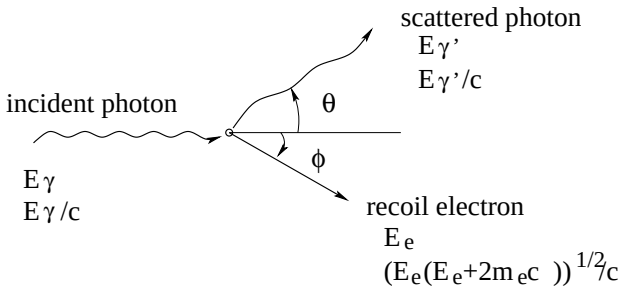

図 1.4: Compton 散乱

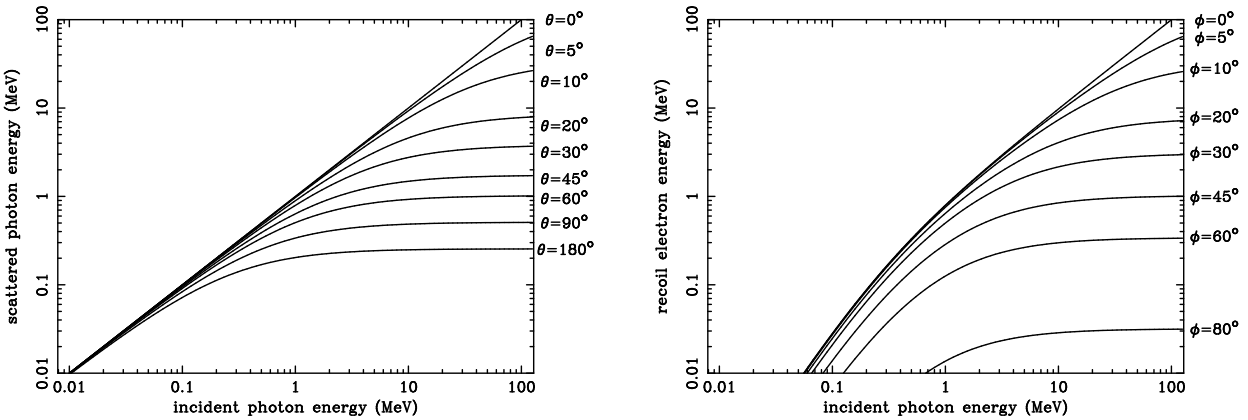

図 1.5: 入射光子エネルギーと散乱光子 (左)、反跳電子 (右) のエネルギーの関係。散乱光子に関しては散乱角 θ、反跳電子に関しては放出した角度 ϕ をパラメータとして示してある。

する。また、エネルギーが高くなると徐々に減少はするが、その変化は少ない。後方 ($\theta = \pi$) に散乱されたとき散乱光子のエネルギーは最小となって

$$E_{\gamma',\mathrm{min}} = \frac{E_\gamma}{1+2\alpha} \tag{1.6}$$

であり、このとき反跳電子のエネルギーは最大となって

$$E_{e,\mathrm{max}} = E_\gamma \frac{2\alpha}{1+2\alpha} \tag{1.7}$$

となる。図 1.5 に、θ をパラメータとした散乱前後の光子のエネルギーの関係と、ϕ をパラメータとした入射光子と反跳電子のエネルギーの関係を示す。

3. 電子対生成

光子のエネルギーが電子の静止質量エネルギー $m_e c^2$ の 2 倍を越えると、原子核の電場内で電子陽電子対が生成されて光子が完全吸収される過程が起こる。原子核があるためにエネルギーと運動量の保存則を満たして光子は吸収される。対生成が起こると、現象的には $E_{\gamma'} = m_e c^2$ のエネルギーを持った 2 個の光子 (3 個もあり得る) がほぼ相対する方向に放出されるが、これは対生成過程でできた陽電子が物質中の電子と結合して消滅することによって生じたもので、この γ 線を消滅放射 (annihilation radiation) という。対生成によって生じた電子、陽電子の運動エネルギーを E_-, E_+ とすると、次の関係が成立する。

$$E_- + E_+ = E_\gamma - 2m_e c^2 \tag{1.8}$$

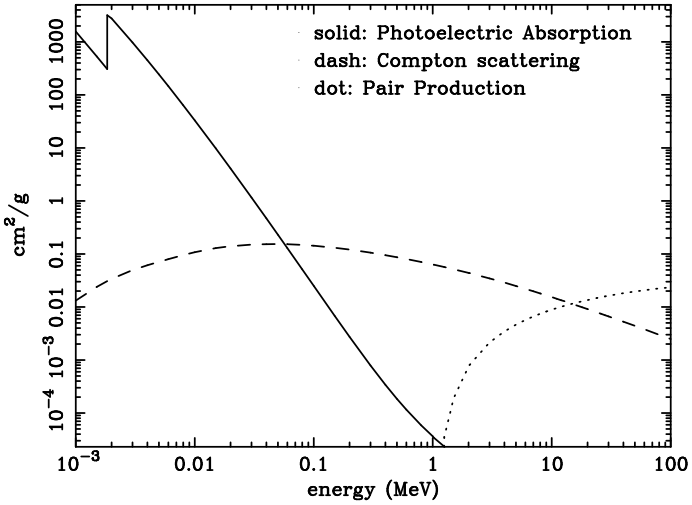

図 1.6: シリコンに対する X 線の各相互作用の断面積。通常観測する X 線領域 (数百 eV – 数十 keV 程度) では光電吸収が支配的となる。

1.3.2　X 線の減衰

1.3.1 項の 3 つの過程に関する原子 1 個あたりの断面積を、それぞれ $\sigma_{\rm photo}$, $\sigma_{\rm comp}$, $\sigma_{\rm pair}$ とし、その物質の質量数を A、密度を ρ、Avogadro 数を N_a とする。単位体積中の原子数は $\rho N_a A^{-1}$ で与えられ、断面積と単位体積中の原子数の積は cm^{-1} の次元を持つ。これを線減衰係数と呼ぶ。すなわち、光電吸収、Compton 散乱、電子対生成の線減衰係数は

$$\tau = \left(\frac{\rho N_a}{A}\right)\sigma_{\rm photo},\quad \sigma = \left(\frac{\rho N_a}{A}\right)\sigma_{\rm comp},\quad \kappa = \left(\frac{\rho N_a}{A}\right)\sigma_{\rm pair} \tag{1.9}$$

と書くことができる。

このような線減衰係数を用いると、強度 I_0 の X 線が厚さ x の物質層を通過した後の強度 I は、$\mu = \tau + \sigma + \kappa$ として、

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{1.10}$$

で表される。X 線が物質中で相互作用を起こさないで透過する平均距離 λ は次式のように線減衰係数の逆数となる。λ を X 線の減衰長 (Attenuation Length) と呼ぶ。

$$\lambda = \frac{\int_0^\infty x e^{-\mu x} dx}{\int_0^\infty e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \tag{1.11}$$

また、線減衰係数は密度 ρ に比例している。そこで、μ を ρ で割った値 μ_m を定義する。

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.12}$$

μ_m は質量減衰係数と呼ばれ、物質層の厚さを $\mathrm{g\ cm}^{-2}$ で表す場合に使用される。与えられた X 線エネルギーに対し、質量減衰係数の値は吸収物質の物理的状態によって変化しない。例えば水の場合、液体であっても蒸気であってもこの値は同じである。

シリコンに対する 1 keV – 1 MeV での X 線の各相互作用の断面積 (質量減衰係数) を図 1.6 に示す ([2])。X 線天文学において通常観測する X 線のエネルギーは数百 eV から数十 keV 程度であり、相互作用としては光電吸収が支配的である。

第2章　X線CCD検出器

X 線 CCD 検出器は、固体撮像検出器の中では比較的大面積にすることが可能で、ピクセルの大きさで決まる高い位置分解能と中程度のエネルギー分解能を有し、2 桁のエネルギー範囲に渡る X 線の検出が可能なバランスのとれた検出器である。これまでに日本の X 線衛星「あすか」「すざく」に搭載されたほか、海外の衛星 (XMM-Newton, Chandra) にも搭載され、X 線望遠鏡の焦点面に用いられる標準的な検出器となっている。

2.1　X線CCD検出器の構造

X 線 CCD 検出器は基本的に、金属 (Metal) の電極、酸化物 (Oxide) の絶縁層、半導体 (Semiconductor) の MOS 構造で構成されている。X 線 CCD 検出器の断面図を図 2.1 に示す。

2.1.1　空乏層と中性領域

X 線 CCD 検出器は、基本的には MOS ダイオードをモザイク状に多数並べたものとして理解される。p 型半導体を考えた場合の空乏層と中性領域について説明する。

電極に正電圧をかけると、半導体部分では多数キャリアである正孔が電極とは逆向きに移動し、一時的にキャリアのない領域を形成する。この領域のことを空乏層 (Depletion Layer) という。ここで、正電圧をさらに大きくすると空乏層が厚くなるが、空乏層の厚さはどこまでも厚くなるのではなく、ある厚さになると空乏層中で熱的に発生した電子正孔対のうちの電子が、空乏層中に存在する内部電界により絶縁層の方向に移動し、絶縁層との界面付近にたまりはじめる。すると、電極から伸びている電気力線は界面の電子に終端し、外部電圧をさらに増やしても空乏層の厚さはほとんど変化しなくなる。界面付近では少数キャリアである電子の数密度が増大するという意味で、このような状態を反転状態とよぶ。一方、空乏層にはイオンが残っており、イオンと移動したキャリアの間には、外部から加えられているのとは逆向きの電場が生じる。これが外部からの電場と釣り合うとキャリアの移動が止まるため、電場が 0 となる領域が存在する。この領域を中性領域という。

半導体に p 型シリコンを使った CCD の場合、空乏層内で X 線が光電吸収されると、生成された電子正孔対のうち電子が電極に印加した電圧により空乏層内の絶縁層付近に移動し蓄積される。また、電極に加える電圧を規則的に変化させることで、蓄積された電荷を読み出し口まで転送し、最終的に電圧信号として読み出している。p 型シリコンを使った CCD では電子がチャネル中を転送されるため、“N チャネル CCD” と呼ばれる。一方、n 型シリコンを使った CCD ではキャリアは正孔であるため “P チャネル CCD” と称される。

2.1.2　表面チャネル型 CCD と埋め込みチャネル型 CCD

MOS 構造の CCD は電荷の転送を行なう深さの違いによって表面チャネル型 CCD (Surface channel CCD) と埋め込みチャネル型 CCD (Buried channel CCD) に分けられる。この二つの CCD に $+V$ の電圧を印加したときのポテンシャルを図 2.2 に示す。

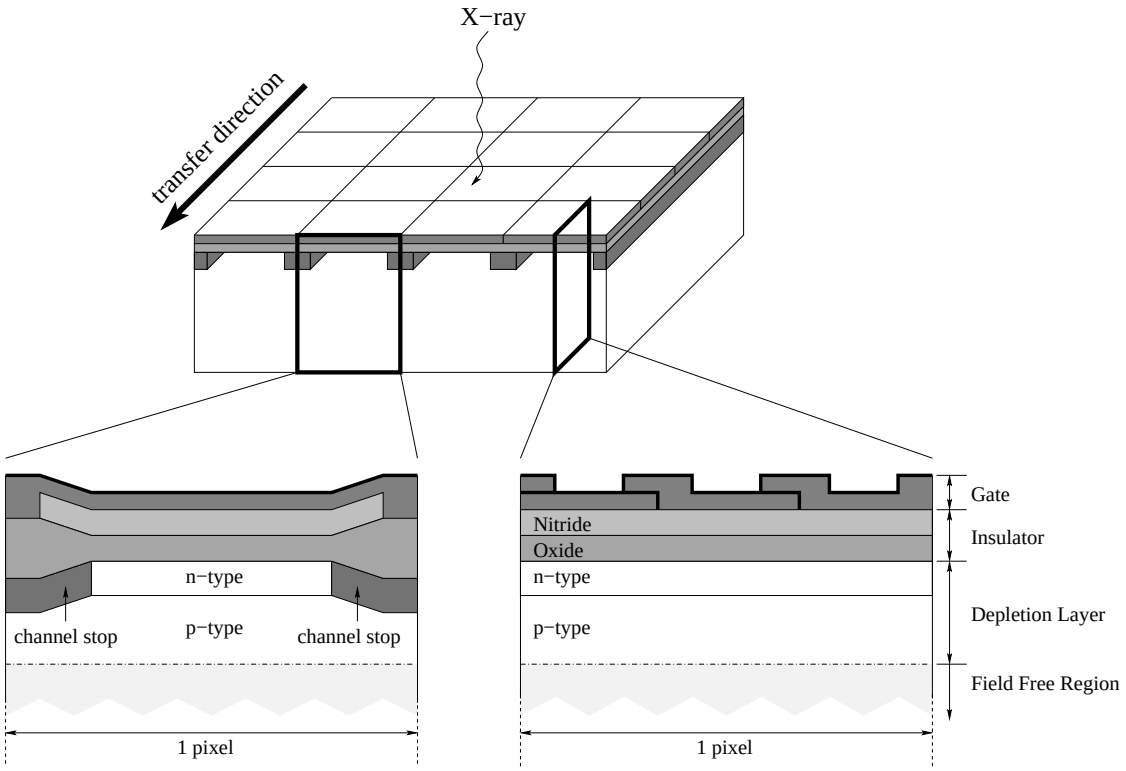

図 2.1: X 線 CCD 検出器 (三相) の断面図。基本的に、CCD は MOS ダイオードをモザイク状に多数並べたものである。[9]

表面チャネル型 CCD は、金属-絶縁体-p 型シリコンという構造になっている。空乏層で生成された電子は絶縁層と空乏層の境界付近に集められる。しかし、Si-SiO_2 境界面においては界面トラップが生成されやすく、電荷の再結合による電荷損失をまねくため、検出器の性能劣化につながる。

埋め込みチャネル型 CCD では、絶縁体と p 型シリコンの間に n 型シリコンをはさんだ構造になっている (図 2.1)。さらに外部から印加する電圧を工夫することにより、ポテンシャルの極大の位置を Si-SiO_2 境界面よりも深い位置に移動させ、界面トラップの影響を軽減させている。現在生産されている CCD はほとんどこの埋め込みチャネル型 CCD である。

2.1.3　チャネルストップ

チャネルストップは、電荷転送方向に沿ってピクセル同士の境界に設置されている (図 2.1)。アクセプタイオンを集中的にドープして、物理的にピクセル境界にポテンシャル障壁を形成し、各ピクセルに蓄えた電荷が転送中に転送方向と垂直方向に洩れ出さないように、また、各ピクセルに電荷を蓄えておく間に電荷が他のピクセルに洩れ出さないようにしている。

2.1.4　表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD

CCD はその受光方向の違いにより表面照射型 (Front-Illuminated, FI) CCD と裏面照射型 (Back-Illuminated, BI) CCD の 2 種類に大別される。表面照射型 CCD は電極側を受光面としたもので、裏面照射型 CCD はその反対側を受光面としたものである。

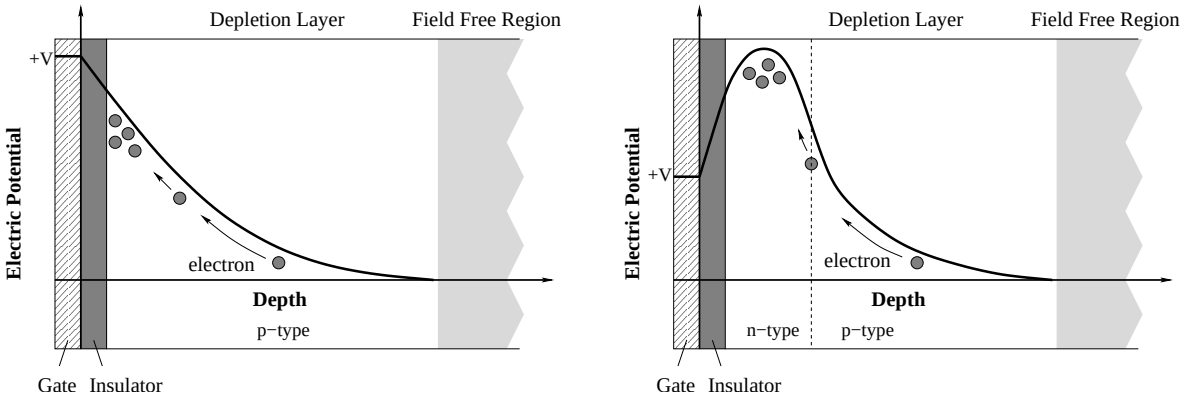

図 2.2: 表面チャネル型 CCD(左) と埋め込みチャネル型 CCD(右) の断面構造のポテンシャル [9]。
電子は自らにとってポテンシャルが低いところに引き寄せられて蓄積される。

- 表面照射型
  電極側から入射させるため X 線が空乏層の中でも電極近くで吸収されやすい。そのため Si 中を電荷が電極へ向かう際に起こす拡散 (2.2.4 節参照) や再結合の効果が小さく、エネルギー分解能に優れる。ところが受光面に poly-Si 電極 (XIS[1]の場合で厚さ ~ 0.3 μm) や SiO_2 絶縁層 (同じく厚さ ~ 0.4 μm) といった構造を持つために低エネルギー X 線の透過率が悪く、その分だけ検出効率が下がる。

- 裏面照射型
  電極や絶縁層と同様に不感層 (または遮光層) として働いてしまう中性領域をほぼ完全に取り除くように加工されている。そのため、低エネルギー側の検出効率は表面照射型 CCD に比べて優れている。ところが X 線の吸収点が電極から遠くなるためエネルギー分解能が悪くなる傾向がある。またその加工は技術的に難しく、表面照射型に比べ歩留まりが悪くなる。

両者の検出効率の例を図 2.3 に示す。図 2.3 において、両者の高エネルギー側での検出効率の差は空乏層の厚さの違いによるもので、裏面照射の方が中性領域を完全に取り除いてしまうため、結果的に空乏層がうすくなってしまうことに起因している。

2.2 検出原理

X 線が CCD に入射すると、ある確率で CCD 内部で光電吸収され、初期電子雲を生成する。電子雲は電極方向へドリフトしながら拡散することになる。表面照射型を例に、検出過程を述べる。

2.2.1 X 線と CCD の相互作用

X 線が CCD に入射し、光電吸収してから電子雲を形成するまでの過程を順を追って説明する。

[1]「すざく」搭載 X 線 CCD カメラ。

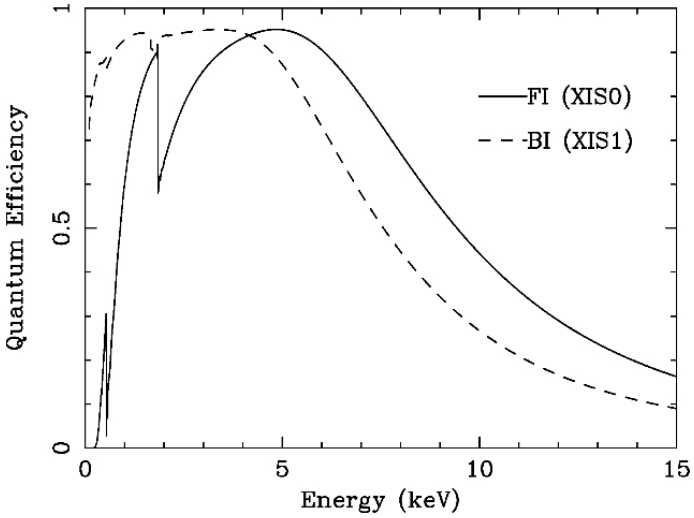

図 2.3: 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD の検出効率の例。「すざく」XIS0 (表面照射型: 実線) と XIS1 (裏面照射型: 破線) の検出効率 [6]。Si 吸収端 (1.84 keV)、O K 吸収端 (0.543 keV) による段差が見られる。裏面照射型 CCD では、不感層による吸収が減るために低エネルギー側の検出効率は高くなる。表面/裏面照射型に依らず、高エネルギー側では空乏層をつき抜けてしまう確率が高くなるために検出効率は低くなる。

2.2.2　光電吸収

1.3.2 節で述べた通り、10 keV 以下の X 線の相互作用は光電吸収が支配的である。CCD に入射した X 線も、エネルギーが低いと空乏層の手前の不感層によって吸収されてしまい、エネルギーが高いと空乏層をつき抜けてしまう。エネルギー E の X 線が空乏層で光電吸収される確率 ($\sim$ 検出される確率) $Q(E)$ は

$$Q(E) = \exp\left(-\int_{\rm DL} \mu_{\rm DL}(E)\ dl\right) \times \left(1 - \exp\left(-\mu_{\rm Si}(E)\ l_{\rm dep}\right)\right) \tag{2.1}$$

$l_{\rm dep}$: 空乏層厚
l : 光子の軌跡に沿った長さ
$\mu_{\rm DL}(E)$: 電極などの遮蔽物の吸収係数
$\mu_{\rm Si}(E)$: シリコンの吸収係数

となる。積分記号の DL は、不感層表面から空乏層との境界までの X 線の軌跡に沿った積分を表す。

2.2.3　電子雲の生成

入射 X 線のエネルギーが Si K 吸収端 (1.84 keV) 以上ならば、X 線はほぼ K 殻に吸収される。Si K 吸収端以下で L 吸収端以上のエネルギーの X 線は L 殻に吸収される確率が高くなる。ここでは入射 X 線が K 殻で吸収された場合を例に、光電吸収後の素過程について説明する。

入射 X 線 (エネルギー $h\nu$) が Si 原子の K 殻に光電吸収されると、X 線のエネルギーが与えられた K 殻電子は原子の束縛に打ち勝ち、光電子となって K 殻の外に飛び出す。そのときの光電子のエネルギーは K 殻束縛エネルギーを $E_{\rm Si-K}$ として、$h\nu - E_{\rm Si-K}$ で与えられる。この光電子が Si 結晶中を

動きまわることにより、価電子帯にいる電子を次々に励起して、$h\nu - E_{\mathrm{Si-K}}$ に比例した数の電子正孔対を作り出す。

一方、光電子を放出した Si 原子は主に L 殻電子が遷移して基底状態に戻る。このとき、そのエネルギー差 $E_{\mathrm{Si-K}}$ が Auger 電子または特性 X 線の放出によって解放される。励起状態の原子では、Auger 電子放出と特性 X 線放出が競合しており、Si 原子の場合は $\simeq 97$ %の確率で Auger 電子が放出される (図 1.3 参照)。残りの $\simeq 3$ %の確率で特性 X 線を放出した場合、過程はやや複雑になる。この特性 X 線が同一ピクセル内で Si 原子に再吸収されれば、そのエネルギーに比例した個数の電子正孔対を作り出すので、Si-K 吸収端で失われたのと等しい個数の電子正孔対を作る。しかし、特性 X 線が隣接しないピクセルで再吸収されたり検出器外に逃げてしまった場合、入射 X 線エネルギーを低く見積もることになる[2]。これをエスケープイベントと呼ぶ。さらに、特性 X 線が再吸収されたピクセルでは Si 特性 X 線が検出される

結局、入射 X 線のエネルギーが同一または隣接するピクセル内で全て解放されたとすると、最終的に作られる電子正孔対の個数 N は

$$N = \frac{h\nu}{w} \tag{2.2}$$

で表される。w は 1 対の電子正孔対を作り出すのに必要なエネルギーである。このとき生成される多数の電子群は初期電子雲と呼ばれている。

w は物質によって決まっており、シリコンの場合は $w \simeq 3.65$ eV である。したがって 5.9 keV の X 線が吸収されると $N \sim 1600$ 対の電子正孔対が作られることになる。初期電子雲の大きさは電子の最大飛程程度と考えられ、形状は近似的に直径 $0.0171 \times (E/\mathrm{keV})^{1.75}$ μm の球で表される [3]。X 線のエネルギー領域では、この値 (5.9 keV に対して $\simeq 0.4$ μm) は CCD のピクセルサイズ (10 – 30 μm) に比べて十分小さく、点とみなすことができる。

光電吸収が空乏層で起きた場合、初期電子雲は電場によって電極付近に集められる。しかし、X 線が中性領域で光電吸収されることもある。中性領域では電場が非常に弱いため、電子雲が電極付近に達するまでには時間がかかる。そのため、伝導帯にある電子が価電子帯に遷移して電子正孔対が消滅する再結合過程の影響が大きくなる。したがって、空乏層で吸収される場合に比べて、電極付近に到達するまでに多くの電荷を失ってしまうことになる。その結果、入射 X 線のエネルギーが過小評価されてしまうため、X 線 CCD 検出器のエネルギー分解能を低下させることになる。そのため、X 線 CCD 検出器においては検出効率の向上という側面だけでなく、エネルギー分解能の劣化を防ぐためにも、できる限り厚い空乏層を形成させる工夫を施す必要がある。ただし、中性領域でできた電子雲は最終的に大きく拡がるため、通常はデータ処理の過程でこれらのイベントを除去するようにしている。

2.2.4 空乏層中での電子雲の移動

光電吸収によって生成された初期電子雲は、電場によって電極方向にドリフトする。その際、自らの熱運動によって熱拡散する。表面照射型と裏面照射型について、電子雲のドリフトおよび熱拡散の様子の模式図を図 2.4 に示す。

[2] L 殻よりも外側の準位間の遷移による光子は、常にピクセル内で吸収されるものと考えてよい。また、Si 原子の K_α 線のエネルギーは 1.74 keV である。

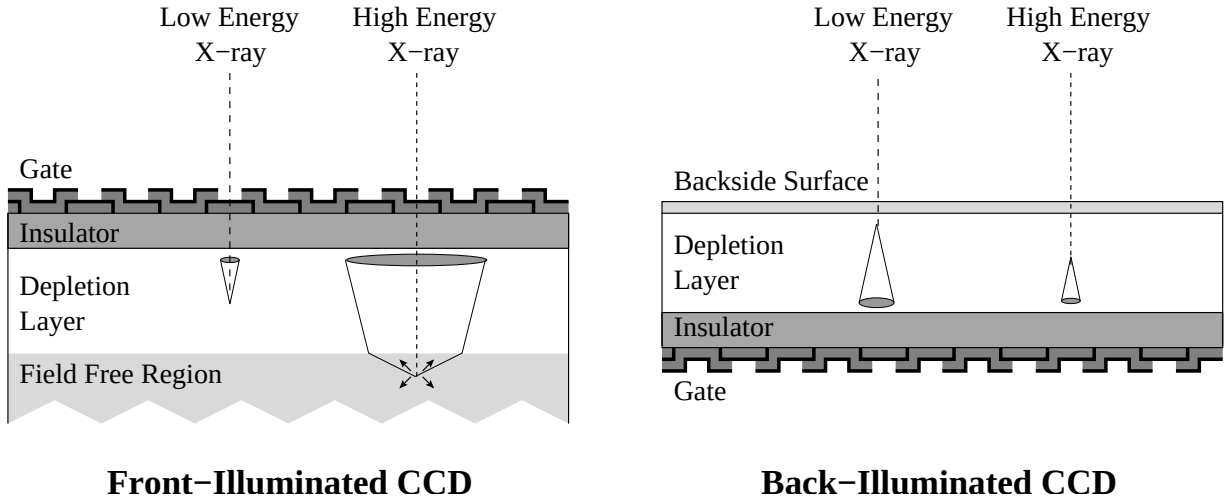

図 2.4: 電子雲のドリフトと熱拡散の様子の模式図 [10]。表面照射型の場合、高エネルギー X 線は CCD 表面から比較的深いところで吸収されるので、電子雲は大きく拡がる。裏面照射型の場合はその逆になる。

2.2.4.1　ドリフト

空乏層で生成された初期電子雲は電極による逆バイアス電圧 V によって電極方向にドリフトする。z 軸を CCD 表面に垂直にとり、転送電極側から見た深さ方向を正とする。

空乏層でのポテンシャル Φ は、シリコンの誘電率 $\epsilon_{\rm Si}$、アクセプタイオン濃度を $N_{\rm A}$ [3]、素電荷を e とすると、Poisson 方程式

$$\frac{d^2\Phi(z)}{dz^2} = \frac{eN_{\rm A}}{\epsilon_{\rm Si}} \tag{2.3}$$

に従う。ここで、境界条件として空乏層の端で、電場と電位がともに 0 とする。つまり、空乏層厚を $l_{\rm dep}$ として、$z = l_{\rm dep}$ で $\Phi = 0$ かつ $d\Phi/dz = 0$ とすると、

$$\Phi(z) = \frac{eN_{\rm A}}{2\epsilon_{\rm Si}} (l_{\rm dep} - z)^2 \tag{2.4}$$

したがって、空乏層での電場 $E(z)$ は、

$$E(z) = -\frac{d\Phi(z)}{dz} = \frac{eN_{\rm A}}{\epsilon_{\rm Si}} (z - l_{\rm dep}) \tag{2.5}$$

となる。また、空乏層には単位面積あたり $Q = -eN_{\rm A}l_{\rm dep}$ のアクセプタイオンが存在する。Gauss の定理より、空乏層での電場 $E(z)$ と絶縁層での電場 $E_{\rm I}$ の間には、絶縁層の誘電率を $\epsilon_{\rm I}$ として次の関係がある。

$$\begin{aligned} \epsilon_{\rm I} E_{\rm I} &= \epsilon_{\rm Si} E(z=0) = Q \\ E_{\rm I} &= \frac{Q}{\epsilon_{\rm I}} \end{aligned} \tag{2.6}$$

したがって、絶縁層中のポテンシャル $\Phi_{\rm I}(z)$ は

$$\Phi_{\rm I}(z) = \frac{Q}{\epsilon_{\rm I}} z + \Phi(z=0) \tag{2.7}$$

[3] XIS の場合、$N_{\rm A} = 3.5 \times 10^{12}$ cm^{-3}

となる。絶縁層の厚さを $l_{\rm I}$ とすると、電極に加える電圧 V と空乏層厚 $l_{\rm dep}$ の関係式が導けて、

$$V = \Phi_{\rm I}(z = -l_{\rm I}) = eN_{\rm A}\left(\frac{l_{\rm dep}}{2\epsilon_{\rm Si}} + \frac{l_{\rm I}}{\epsilon_{\rm I}}\right) l_{\rm dep} \tag{2.8}$$

となる。式 (2.8) は、電圧に加える電圧を大きくすれば単調に空乏層厚が大きくなることを示しているが、実際には V を大きくしていくと、伝導帯に励起されるキャリアが増え、表面付近のキャリア濃度が上昇して反転層を形成するため、空乏層厚はある値以上には大きくならない。

初期電子雲は式 (2.5) で表される電場に引かれて電極方向へドリフトする。ドリフト速度は、熱拡散速度を無視できる条件のもとで移動度 (mobility) μ_z を用いて次式で表される[4]。

$$\frac{dz}{dt} = -\mu_z E(z) = \frac{e\mu_z N_{\rm A}}{\epsilon_{\rm Si}}\left(l_{\rm dep} - z\right) \tag{2.9}$$

また、深さ z で吸収された X 線により生成された初期電子雲が、転送電極 ($z = 0$) に到達するまでに要する時間 t は、X 線が $z = 0$ で吸収されたときに $t = 0$ という条件を使うと

$$t = \frac{\epsilon_{\rm Si}}{e\mu_z N_{\rm A}} \ln\left(\frac{l_{\rm dep}}{l_{\rm dep} - z}\right) \tag{2.10}$$

となり、空乏層厚の半分の深さで吸収されたとすれば、~ 1 nsec (XIS の場合) となる。

2.2.4.2 熱拡散

初期電子雲は、ドリフトと同時に自らの熱運動によって拡散する。そのときの電子雲の運動は拡散方程式に従う[5]。

$$\frac{d\rho_N}{dt} = D\nabla^2\rho_N \tag{2.11}$$

ただし、ρ_N は電子数密度、D は拡散定数である温度 T の場合、拡散定数と移動度の間には Einstein の関係式 (2.12) が成り立つ。Boltzmann 定数を $k_{\rm B}$ として、

$$D = \frac{k_{\rm B}T\mu_z}{e} \tag{2.12}$$

z 軸に垂直な xy 平面で、式 (2.11) を解くと、

$$\begin{aligned}\rho_N &= \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4Dt}\right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right)\end{aligned} \tag{2.13}$$

となる。ここで、$r \equiv \sqrt{x^2 + y^2}$ とした。これは、電子数密度 ρ_N が 2 次元 Gauss 分布となることを示しており、そのときの電子雲を転送電極上に射影したときの拡がり σ は、

$$\sigma = \sqrt{2Dt} = \sqrt{2D\frac{\epsilon_{\rm Si}}{e\mu_z N_{\rm A}} \ln\left(\frac{l_{\rm dep}}{l_{\rm dep} - z}\right)} \tag{2.14}$$

[4]通常の X 線 CCD 検出器の動作条件 ($T \sim 180$ K) では、熱拡散速度 $v_{\rm T} = \sqrt{3k_{\rm B}T/m_e^*} \sim 2 \times 10^7$ cm/sec であり (m_e^* は電子の有効質量)、式 (2.9) から計算されるドリフト速度は、$\sim 10^7$ cm/sec である (XIS の場合。$\mu = 1500$ cm^2/V/sec として計算した)。

[5]電子間には反発力も働いているが、通常は無視できる。

となる。この熱拡散のために電子雲が複数のピクセルにまたがりやすくなる。ただし、空乏層厚の半分の深さで吸収されたとすれば $\sigma \sim 2.4$ μm 程度 (XIS の場合) であるのに対し、1 ピクセルの大きさは数 10 μm なので、1 個の X 線光子がつくる電子雲の多くは 1 ピクセルにおさまり、複数のピクセルにまたがるにしても 2×2 ピクセルの範囲におさまる。

2.3　電荷転送と読み出し

各ピクセルに蓄えられた電荷は、読み出し口まで転送され最終的に電圧信号として取り出される。転送から電荷-電圧変換を経て読み出されるまでの流れを説明する。

2.3.1　転送方式

CCD の利用目的の違いにより、以下のような転送方式がある。

Full Frame Transfer 型 (図 2.5)
Full Frame Transfer 型 CCD は、撮像領域をそのまま読み出し領域に使っており、他の CCD のような蓄積領域や縦転送専用領域がないため構造的には最も単純な CCD である。むき出しの CCD は電荷転送中も受光をするため、CCD の電荷転送が十分速く行われない場合は転送途中で光子を受けてしまうことがあり、本来とは異なる位置の情報を持った電荷が発生しまうことになる。そのため、Full Frame Transfer 型 CCD は通常、シャッターを併用することでこの問題を回避している。ただし、シャッターは機構が複雑になり信頼性に欠けるので衛星搭載品としては通常は使わない。また、露光も間欠的になる。

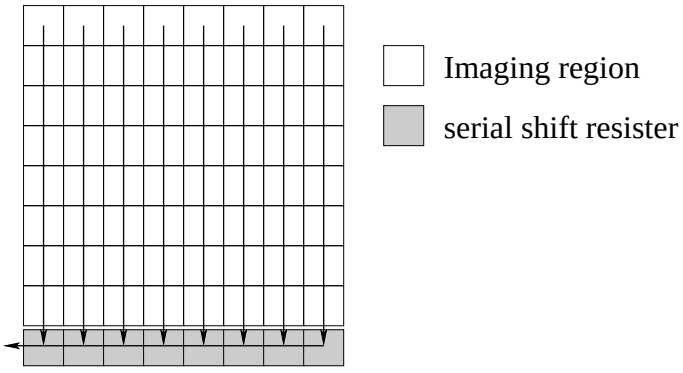

図 2.5: Full Frame Transfer 型の転送方式の模式図

Frame Transfer 型 (図 2.6)
Frame Transfer 型 CCD は通常の撮像領域の他に、露光後の CCD フレームデータを一時的に保持しておくための蓄積領域を持つ。蓄積領域は撮像領域と同様に CCD 素子を用いたメモリアレイとなっているが、上面にシールドを設け、高エネルギー X 線に対しても常に遮光された状態を作っている。撮像領域である受光面のデータを短時間で蓄積領域に転送し、蓄積領域から読み出し口まで転送が行なわれると共に、受光面では次の露光が行なわれる仕組みになっている。蓄積領域の上面を遮光することが容易であるため、衛星搭載用 X 線 CCD 検出器ではこの方式が主流である。ただし、CCD の半分しか撮像に使えず、蓄積領域に至るまでの短時間の縦転送中は、入射 X 線位置が正しく記録されない。

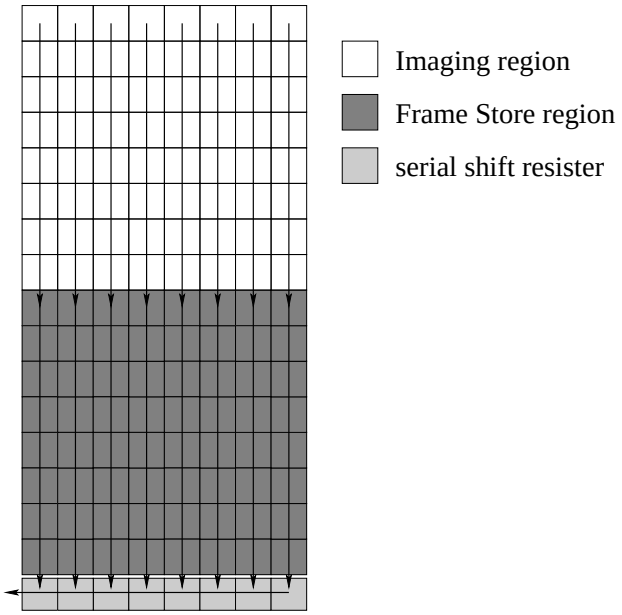

図 2.6: Frame Transfer 型の転送方式の模式図

Interline Transfer 型 (図 2.7)
Interline Transfer 型 CCD は撮像領域と縦転送専用ピクセルが 1 ラインずつ交互に並んだものであり、縦転送専用ピクセルは全て遮光されている。Interline Transfer 型は隣接した遮光部に電荷を送ることができるため、転送中に受光することがないという点で優れている。しかしながら、縦転送専用領域は構造上、高エネルギー X 線を遮断するほどのシールドができないため、この方式の CCD は可視光用として使用される。また、CCD の受光部の開口率 (撮像領域全体に対する受光領域の割合) が上記の CCD と比べて小さいという短所がある。可視光の場合はマイクロレンズアレイを使うことでこの短所は解消できるが、X 線ではこの方法は使えない。Interline Transter 型 CCD は主にビデオカメラ等で採用されている。

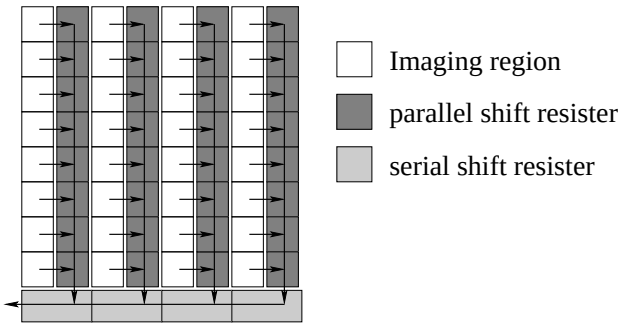

図 2.7: Interline Transfer 型の転送方式の模式図

2.3.2 転送方法

CCD は 2 次元の画像データを 1 個 (CCD の種類によっては複数) の読み出し口から出力するため、各ピクセルに蓄えられた電荷を読み出し口まで縦及び横転送させなければならない。Frame Transfer 型 CCD を例に、転送の順序を追っていく (図 2.8)。

まず、1 フレームの露光が終了するとピクセルに蓄えられた電荷は ST (Storage or Frame-Store) clock によって蓄積領域に高速転送される。次に、縦転送クロックによって 1 ラインずつを serial shift register に転送する。serial shift register は横転送のみを行なうレジスタである。serial shift register 内の電荷が横転送クロックで全て読み出し口まで転送されたら、次の 1 ライン分の縦転送を行なう。

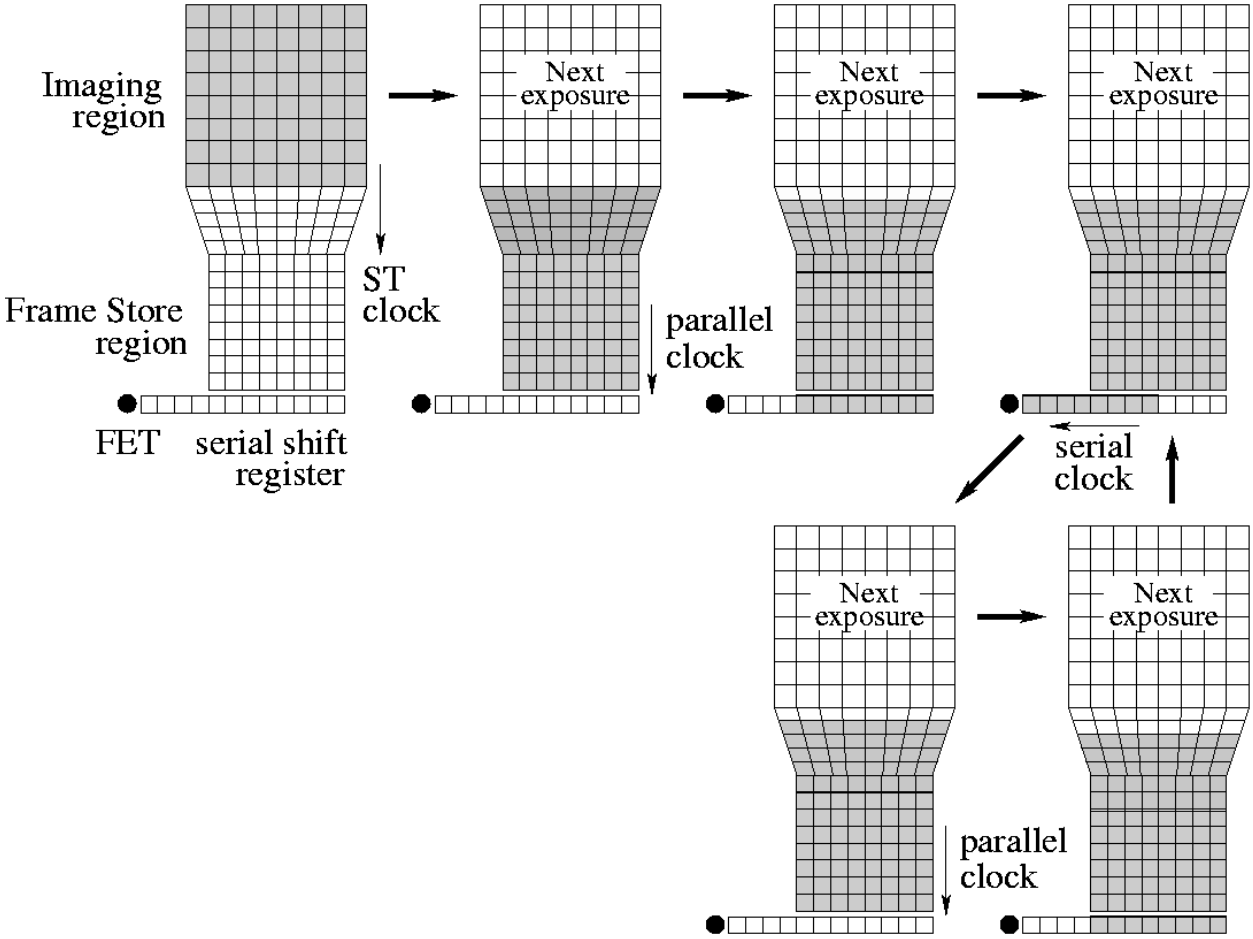

図 2.8: Frame Transfer 型 CCD における電荷転送の時系列 [9]。撮像領域 (Imaging Region) に蓄積された電荷は ST clock によって蓄積領域に高速転送される。蓄積領域では縦転送クロックによって 1 ラインずつ serial shift resister に転送し、serial shift register では横転送クロックで読み出し口まで転送する。これを全てのラインについておこなうことで、全てのピクセルの電荷を読み出し口に転送することができる。

以下、これらを垂直方向のピクセル分だけ繰り返していく。こうして、1 フレームに蓄えられた電荷の全てが読み出し口へ到達することになる。読み出し口ではその電荷が電圧に変換されて出力信号となる。

電荷転送クロックには、組み合わせているクロック (電極に与える電圧レベルの周期パルス) の数に応じて二相クロック、三相クロックなどがある。それぞれの動作原理を図 2.9 に示す。二相クロックでは一つ一つの電極下にイオン注入等を施して同一電極においてポテンシャルの差ができる構造にしておき、二種類のクロックを交互に反転させて電荷を転送させている。この場合、図 2.9 の左図の様に転送方向がイオン注入の仕方に従った方向のみに限られる。

2.3.3　Overclocking

以上で CCD チップの全ピクセルの電荷を読みだすことができるが、科学目的の使用では転送・読み出しにおけるノイズの評価のためにピクセル数以上の読み出し (overclocking) を行なうことが多い。こうして得られた仮想的なイメージ領域を Over-Clocked Region と呼ぶ。

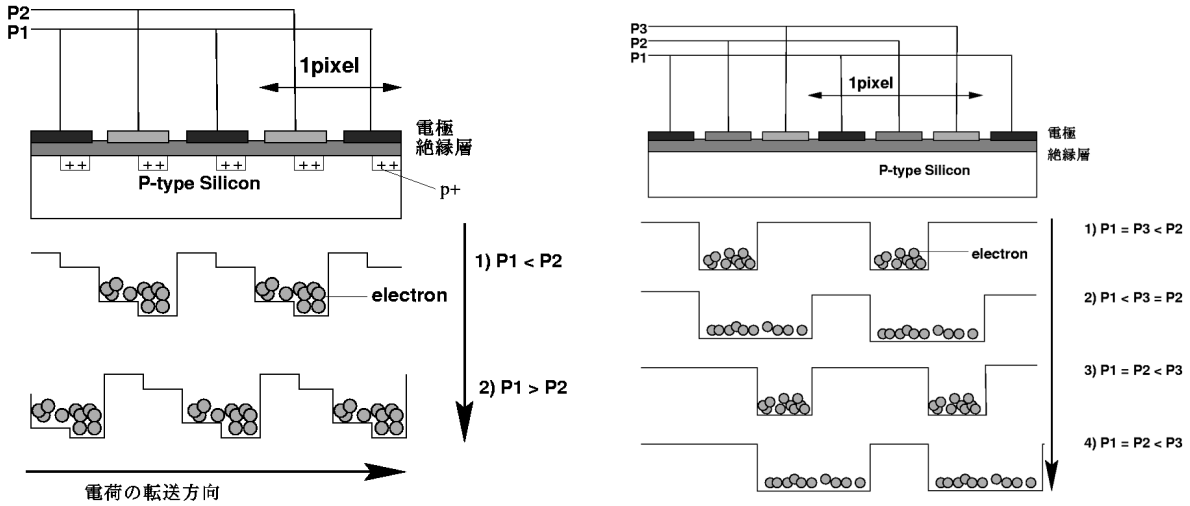

図 2.9: 二相クロック (左) と三相クロック (右) による電荷転送の模式図 [9]。下の図はクロックパターンごとのポテンシャルレベルを示している。

横転送に overclocking をすることで作られる仮想イメージ領域を Horizontal Over-Clocked region (HOC 領域)、縦転送に overclocking をすることで作られる仮想イメージ領域を Vertical Over-Clocked region (VOC 領域) と呼ぶ。

2.3.4 電荷-電圧変換

各ピクセルに蓄えられた電荷は、電荷転送によって読み出し口まで運ばれ、電圧レベルに変換される。読み出し口での電荷-電圧変換の方法として、FDA (Floating Diffusion Amplifer) が広く使われている。FDA は電荷リセット用 MOSFET (MOS FET 1) と電荷-電圧変換用 MOSFET(MOS FET 2) で構成され、リセット用 FET のゲート (RG: Reset Gate) とドレイン (RD: Reset Drain)、並びに電荷-電圧変換用 FET のドレイン (OD: Output Drain) とゲート (OG: Output Gate) に外部回路から電圧を印加して使用する。出力信号は電荷-電圧変換用 FET のソース (OS: Output Source) に適当な負荷抵抗をとりつけて取り出す。1 ピクセル分の信号を読み出すには次のような手順をとる。

1. SG-Low, RG-Low (Reset)
   RG が Low になると、RD と読み出し口が等電位になり、蓄積されていた電荷は RD 側へ捨てられる。

2. SG-Low, RG-High (Floating level)
   SG からの電荷転送待ち状態となる。このときの読み出し口の電位を floating level という。

3. SG-High, RG-High (Signal level)
   SG から電荷が転送され、N チャネル CCD の場合は読み出し口の電位が減少する。このときの読み出し口の電位を signal level という。これで 1 画素の電荷量が読み出される。

これをまた 1 から繰り返し、次々と読み出していく。FDA によって変換された CCD 出力波形は、図 2.11 のようになる。Floating Level から Signal Level に移り変わるところで、Serial Register から読み出し口に電荷が送り込まれている。Floating Level と Signal Level の差は、各ピクセルに蓄え

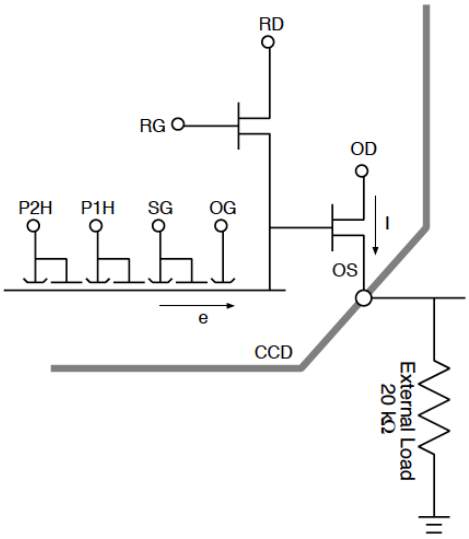

図 2.10: X 線 CCD 検出器の電荷検出機構 (FDA)[11]

られた電荷量に比例しており、これを外部回路で測ることによってそのピクセルの信号波高値が分かる。ただし、光が CCD に入射していないときも Floating Level と Signal Level の差はゼロにはならない。これは、主に暗電流と寄生容量による電気的なオフセットがあるためで、この成分をゼロレベルと呼んでいる。

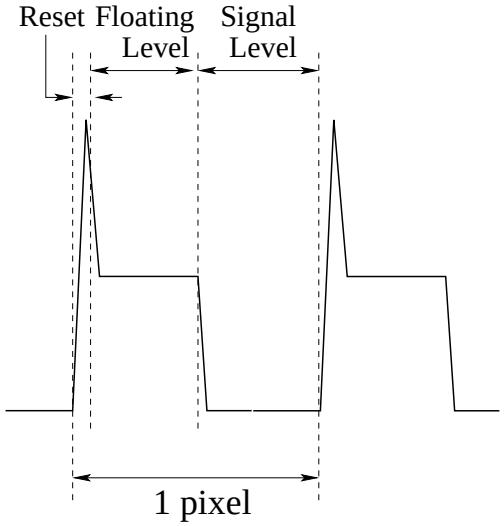

図 2.11: CCD の出力波形。読み出し口に送られた電荷は、読み出し用のコンデンサに蓄えられ、Siganl Level の電圧をつくる。この電荷は Reset Pulse と共に排出され、Floating Level の電圧値となる。

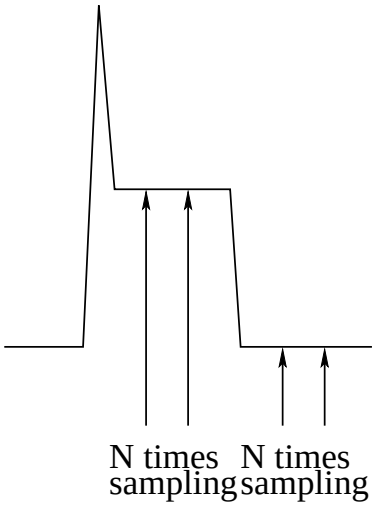

図 2.12: 相関多重サンプリング

2.3.5 波高値の取得

CCD の各ピクセルの出力信号の大きさを波高値 (Pulse Height: PH) と呼ぶ。図 2.11 に示した出力信号から PH を求めるには、Signal Level と Floating Level をサンプリングし、その差を調べれば良い。PH を算出するために用いられる出力信号のサンプリング法を以下に挙げる。

2.3.5.1 相関多重サンプリング

相関多重サンプリングは、Signal Level と Floating Level の値をそれぞれ複数回サンプリングしその差の平均値を求める手法である (図 2.12)。サンプリングの回数が多い程ノイズは平均化されるので分解能が向上する。ただし、相関多重サンプリングは ADC のサンプリング速度に制限されており、サンプリングの回数が増えるとその分データ取得にも時間がかかってしまう。サンプリングの回数が 1 回の方式を相関二重サンプリングと呼ぶ。ASTRO-H SXI では相関多重サンプリングを採用する。

2.3.5.2 積分方式

積分方式は積分回路を使った手法である。積分回路で Signal Level と Floating Level をそれぞれ一定時間積分し、その差をとることによってピクセルの PH を算出する (図 2.13)。この方式は信号の各レベルをある区間に渡って積分するため、相関多重サンプリングと同様にノイズが平均化され出力値の精度が向上する利点がある。また、遅延回路や相関多重サンプリングにおいて生じるような制限はなく、高速データ取得に向いている方式である。その一方で、積分時間のゆらぎが精度に直接影響する弱点がある。「すざく」XIS はこの方式を採用している。

2.4 イベント抽出

最終的に電極付近に到達した電子雲は、式 (2.14) の拡がりを持つ。この最終的な拡がりが 1 ピクセル内におさまっていれば (シングルピクセルイベント)、そのピクセル内の電荷を測れば入射した X 線のエネルギーを正確に見積もることができる。しかし、ピクセル同士の境界面付近で X 線が吸収

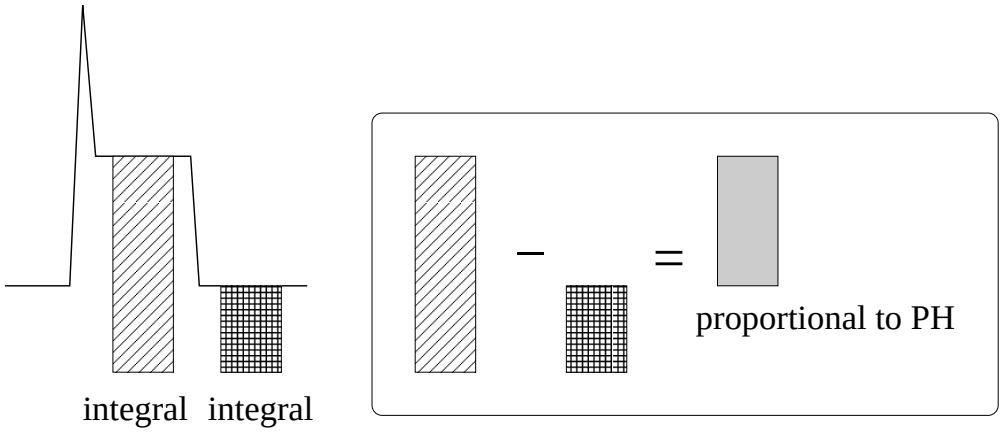

図 2.13: 積分方式によるサンプリング

されたり、熱拡散などによって電子雲がピクセルサイズ以上に拡がった X 線イベント (スプリットイベント) は、隣接ピクセルに電子が洩れこんでいるため、その分の電荷も足す必要がある。実際機上で観測を行うと、X 線のほかにも宇宙線荷電粒子 (主に地球磁場に補足された陽子) 起源のさまざまなイベントも検出してしまう。これら宇宙線起源のイベントは除去しなければならない。そこで、得られた各ピクセルの PH からゼロレベル (主に暗電流と電気的オフセット成分) を差し引いてピクセルに蓄えられた電荷量に比例した値に直し、その値に対して X 線イベント抽出を行なう。現在、X 線イベントを判別・処理し、元の電荷量を見積もる方法として、Grade 判定法とフィッティング法の 2 種類が知られている。ここでは充分実用化されている Grade 判定法のみ説明する。

2.4.1　Grade 判定法

Grade とは電子雲の形状や拡がりをパターン化し、分類したものである。具体的には、全てのピクセルの中からピクセル中に蓄えられた電荷が Event threshold を越えたピクセルを選び、さらにそのピクセルの電荷がそのピクセルを中心とする 3×3 ピクセルの中で最大であるものは、中心ピクセルで X 線 (または荷電粒子) と CCD の相互作用があったとしてイベントとする。そして、中心ピクセルの周辺の 8 ピクセルについて、蓄えられた電荷が Split threshold を越えているかどうかで Grade に分類する。分類された Grade に従って、Split threshold を越えたピクセルの全て、もしくはその一部について電荷を足しあげて、入射 X 線のエネルギーを再現する。Split threshold を越えなかったピクセルの電荷は、ノイズ成分であるとして無視する。

XIS では Grade 0、Grade 2、Grade 3、Grade 4、Grade 6 を X 線イベントであるとして採用している。宇宙線荷電粒子起源のイベントはその軌跡に沿って大きな電子雲を作るために複数のピクセルにまたがることになるので、例えば Grade 7 に分類されて除去されることになる。Grade 判定法は、簡単に入射 X 線のエネルギーを見積もることができるという利点がある。しかし、Split threshold を越えないピクセルの電荷は、それが X 線起源であったとしても、ノイズ成分との区別がつかないので加算されない。

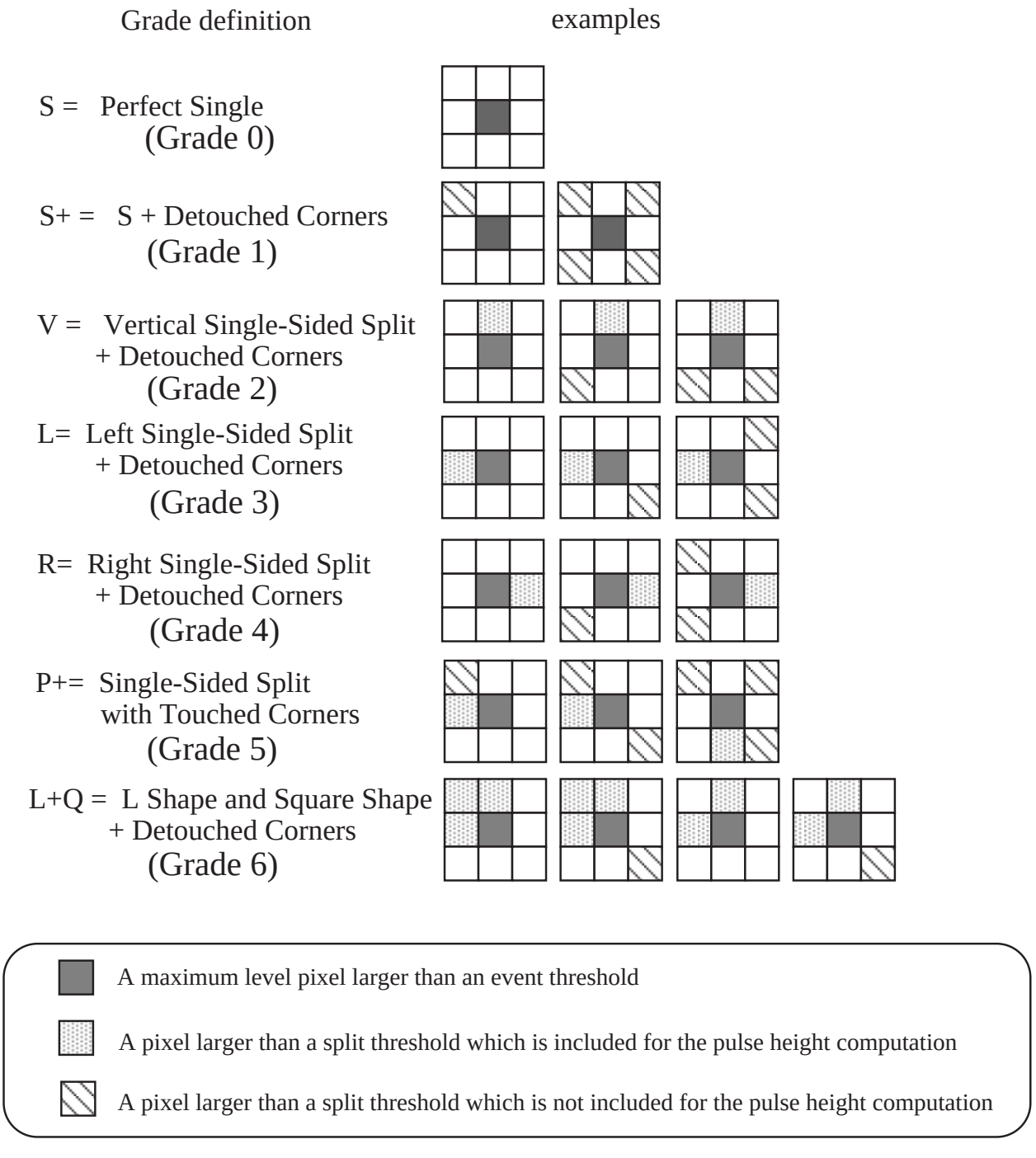

図 2.14: Grade 判定法による Grade の定義 [12]。Grade 0 – 6 のいずれにも当てはまらないイベントは Grade 7 に分類される。

2.5　性能の指標

CCD を検出器として使用する場合、X 線のエネルギーや入射位置をより正確に決定すること、X 線をより効率的に検出することが性能として求められる。以下、検出器として求められる性能についてまとめる。

2.5.1　エネルギー分解能

CCD に単色 X 線が入射し、検出されたときに出力される PH のヒストグラムは、ある幅 (エネルギー分解能) をもった Gauss 関数で近似できる。この幅を決定するのは、入射した X 線によって生成される電子数の統計的な揺らぎと読み出しノイズも含めたゼロレベルの揺らぎである。

入射した X 線によって生成される電子数の統計的な揺らぎは、標準偏差が電子数の 1/2 乗に比例する Gauss 分布になることが知られ、その比例係数は Fano 因子と呼ばれる。Fano 因子は、電離・励起過程における個々の衝突が独立で起こるものであれば 1 となるはずである。しかし、実際は個々の衝突が独立でないために揺らぎは小さくなり、Fano 因子は 1 よりも小さくなる。この統計的な揺らぎが X 線 CCD 検出器の限界分解能を決定している。一方、電子数の統計的な揺らぎ以外にも CCD の分解能に関係する揺らぎが存在する。それは、主に暗電流の揺らぎと読み出しノイズによる揺らぎで、以後これをゼロレベルの揺らぎと呼ぶことにする。

これらの揺らぎから、エネルギー E の X 線が検出された場合の X 線 CCD 検出器のエネルギー分解能は、1 対の電子正孔対を作るのに必要な平均のエネルギー $w = 3.65$ eV と Fano 因子 $F = 0.12$、ゼロレベルの揺らぎ N を用いて以下の式で表される。

$$\delta E = \sqrt{F \times \frac{E}{w} + N^2} \tag{2.15}$$

一般的にエネルギー分解能を表すときには、半値幅 (Full Width at Half Maximum: FWHM) が使われる。これは、ピークの最高値のちょうど半分の高さにおける分布の幅で定義される。Gauss 分布の場合は、式 (2.15) を $\sqrt{8 \ln 2} \sim 2.35$ 倍したものとなる。外部ノイズの影響を全く受けなかった場合 ($N = 0$) の CCD のエネルギー分解能は Mn K_α (5.9 keV) で 120 eV である。これが CCD のエネルギー分解の理論上の限界となる。

2.5.2　量子検出効率

入射した X 線のうち、検出できる割合を示したものが検出効率である。X 線 CCD 検出器における検出効率 Q は、次のように定義される。

$$Q = \frac{N_{\rm detect}}{N_{\rm enter}} \tag{2.16}$$

$N_{\rm detect}$, $N_{\rm enter}$ はそれぞれ CCD で検出された光子数、CCD に入射した光子数である。X 線が空乏層で吸収される確率 (式 (2.1)) が、CCD の検出効率を決定する主要因であるが、現実にはイベント抽出によって X 線イベントとして認識されたものを光子数とするため、イベント抽出の方法によって検出効率は変化する。したがって、イベント抽出には正確かつ最大限、X 線イベントのみを抽出する工夫が必要となってくる。

第3章　ASTRO-H SXI

ASTRO-H に搭載される軟 X 線撮像検出器 SXI は 0.4–12 keV で撮像・分光を行う CCD 検出器である。日本の衛星としては、「あすか」SIS、「すざく」XIS に次ぎ 3 例目となる。基本的には XIS を踏襲したデザインになっているが、随所で新技術を取り入れている。この節では SXI のシステム全体について述べる。エレクトロニクスの詳細は BBM システムの紹介 (5.1 節) で言及することとする。

3.1　SXI システムの全体構成

SXI は軟 X 線望遠鏡 (SXT-I) から 5.6 m 離れた焦点面に配置される。大きく SXI-S (S: Sensor)、SXI-PE (PE: Pixel processing Electronics)、SXI-DE (DE: Digital Electronics)、SXI-CD (CD: Cooler Driver)、SXI-MXS (MXS: Modulated X-ray Source) の 5 つから構成される。衛星上での位置関係を 図 3.1 に、構成する電子回路のブロックダイヤグラムを 図 3.2 [1]に示す。以下、5 つの構成要素についてそれぞれ述べていく。

3.1.1　SXI-S

SXI-S は焦点面に置かれ、X 線を検出する役割をもつ。カメラボディとアナログ回路、機械式冷凍機から成る。図 3.3 に SXI-S 全体の構造を示す。

中央部がカメラボディ (SXI-S-BDY) であり、CCD 素子が格納される。ボディには厚さ 10–35 mm のアルミニウムを使用し、軌道上の放射線をシールドする。

検出効率をできるだけ高くするため、CCD 素子には新たに開発した P チャンネル型裏面照射 CCD を採用する。表面照射型では、電極構造により低エネルギー側の X 線が吸収されてしまい検出効率が低くなるが、裏面照射型を用いることで軟 X 線の検出効率を向上できる。「すざく」XIS-FI CCD と量子効率を比較すると 図 3.4 のようになる。素子は 1 画素あたり 24 μm 四方で、1 枚あたり 1280×1280 画素で構成される。信号は 2×2 画素にビニングして処理する。およそ 3 cm 四方の CCD 素子を 4 枚モザイク状に並べ、X 線望遠鏡と組み合わせておよそ 38 分角四方の視野を実現する。これは X 線反射鏡を用いた検出器としては過去最大となる。CCD 素子は 図 3.5 のようにフレキシブルプリント配線板に接続され、各画素の信号を読み出す。「すざく」XIS では素子の経年劣化に対処するべく SCI (Spaced-row Charge Injection) を導入した。これはシリコン結晶中に発生した電荷トラップをうめるために予め電荷を注入するもので、電荷転送効率が向上する。素子単体の性能評価は [13] が詳しい。

CCD は可視光や紫外線にも感度をもつため、これらを遮断し X 線のみを通すフィルタが必要である。「すざく」 XIS では、可視光と紫外線を遮断するために OBF (Optical Blocking Filter) を素子の上部に装着したが、打ち上げ時の振動で OBF が割れないように、センサハウジングを真空にし

[1] 2010 年 7 月現在、MIO ボード 2 枚で CCD 4 枚分の処理ができないか検討が進められており、この図は変更される可能性がある。

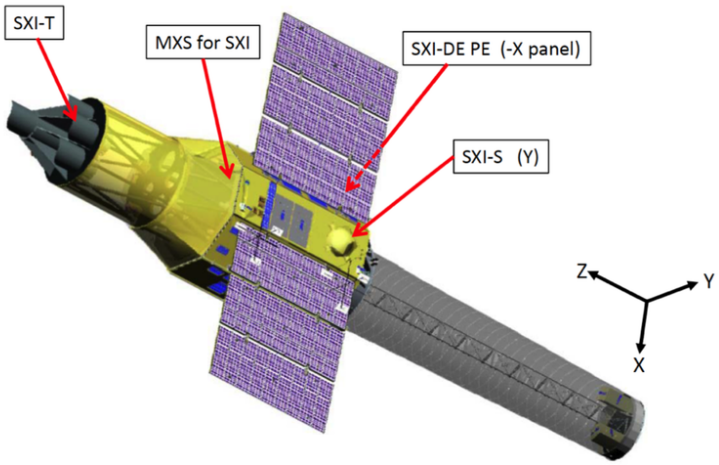

図 3.1: SXI 各部の位置関係。SXI-S は SXT-I から 5.6 m 離れた焦点位置に置かれる。SXI-PE、SXI-DE、SXI-CD はサイドパネルに、SXI-MXS は lower パネルにそれぞれ配置される。図中の座標軸は衛星を基準とした座標系で、光軸と一致するように z 軸を取っている。すなわち、SXI の CCD 素子は xy 平面と平行に置かれる。

ておく必要があった。SXI では、図 3.6 のようにアルミニウムと polyimide ($C_{22}H_{10}O_4N_2$) の薄膜 OBL を CCD 素子表面に蒸着し、可視光と紫外線を反射させる [20]。

一方、宇宙線陽子が衝突することでシリコン結晶には格子欠陥が生じてしまい、性能が劣化する。劣化の性能への影響 (暗電流と CTI) は CCD の動作温度によって変わる。「すざく」XIS では -90°C で動作させているが、1 年ほどで CTI が無視できないほど低下してしまった。そのため、SXI では素子を -120°C に冷却する。冷却にはスターリング冷凍機を利用する。冷凍機は冷却性能としては 1 台で充分であるが、2 台搭載し冗長性をもたせる。また、温度制御用にヒータも取り付けられる。

アナログ回路はドライバーボードとビデオボードの 2 つから成る。ドライバーボードは SXI-PE からの信号を受け、CCD を駆動するためのアナログ信号を出力する。ドライバーボードはカメラボディ隣の SXI-S-FE に収納される。SXI-S-FE では CCD 素子の温度計測やヒータ制御、SXI-S 各部の温度および電圧 (HK) 情報の取得も行う。一方、ビデオボードでは CCD 素子のアナログ出力を AD 変換する。CCD 出力信号への雑音混入を極力防止するため、ビデオボードは SXI-S-BDY 内に置く。

3.1.2 SXI-PE

SXI-PE は衛星のサイドパネルに置かれ、必要なデータ処理の一部をハードウェアで高速処理する。SXI-S-FE に対し CCD 駆動のための指令を出し、AD 変換後のイメージデータを受け取る役割をもつ。加えて、イメージに対しダークレベルの補正を行い、X 線イベント候補を抽出し SXI-DE へ情報を送る。また、HK 情報を SXI-S-FE から取得し、ヒータ制御の指令もここから発行する。SXI-S への電源供給も SXI-PE が担う。SXI-PE には FPGA を搭載したデジタル基板 MIO (Mission I/O) ボードが用いられる。SXI-DE とは 第 4 章 で紹介する機上情報ネットワーク SpaceWire で接続される。

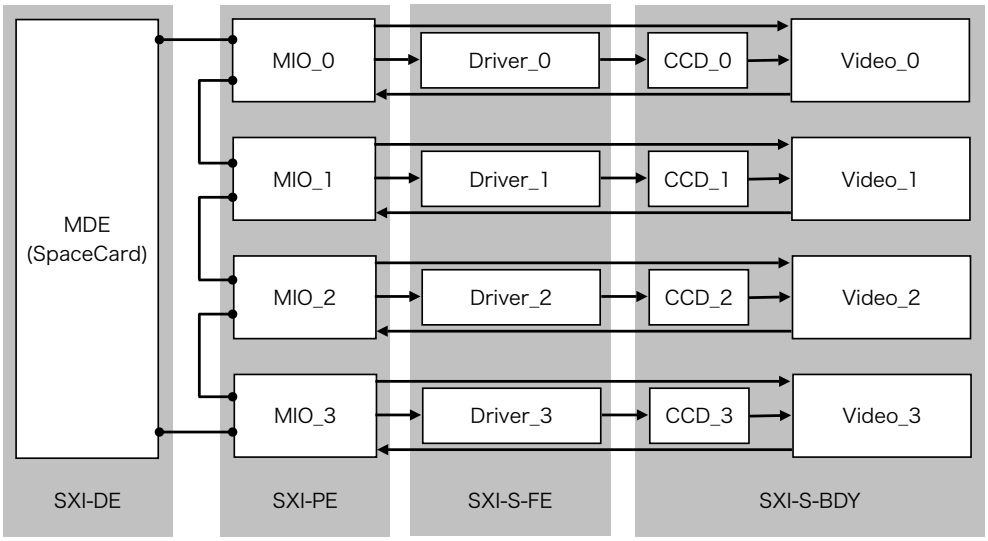

図 3.2: SXI の駆動回路及び読み出し回路のブロック図 ([17] をもとに簡略化)。SXI-PE、SXI-S-FE、SXI-S-BDY 内は CCD 素子 1 枚に対し 1 系統ずつ割り当てられ、各素子について独立して駆動や読み出し処理を行う。MDE ボードと MIO ボードとの間は 4 節 で紹介する SpaceWire で接続される。MIO ボードからはドライバーボードとビデオボードにタイミングクロックが供給され、ドライバーボードからは CCD へ駆動用のアナログ信号が供給される。CCD からのアナログ出力をビデオボードが受け取り、デジタル化した波高値データを MIO ボードへ送る。

3.1.3 SXI-DE

SXI-DE は衛星のサイドパネルに置かれる。ここでは SXI-PE が行わない処理をソフトウェアで柔軟に行う。衛星内の SpaceWire ネットワークにおいて、SXI の対外的な窓口となる。SXI-DE は外部からのコマンドを受けテレメトリを出力する。また、SXI-PE に対してデータ収集の指令を発し、受け取った CCD 画像やイベント候補から X 線の情報を抽出する。ほかにも HK 情報や CCD の温度情報の収集、ヒータ制御に必要な演算などもここで行う。

SXI-DE には CPU と FPGA を搭載する MDE (Mission-DE) ボード (別名 SpaceCard) が用いられる。図 3.2 では省略しているが、実際は SXI-DE が故障した際に備え、バックアップ用に MDE ボードが全検出器共用で搭載される[2]。

3.1.4 SXI-CD

SXI-CD は衛星のサイドパネルに置かれる。ここでは機械式冷凍機の制御を行う。

[2]区別のため X-MDE と呼ばれている。

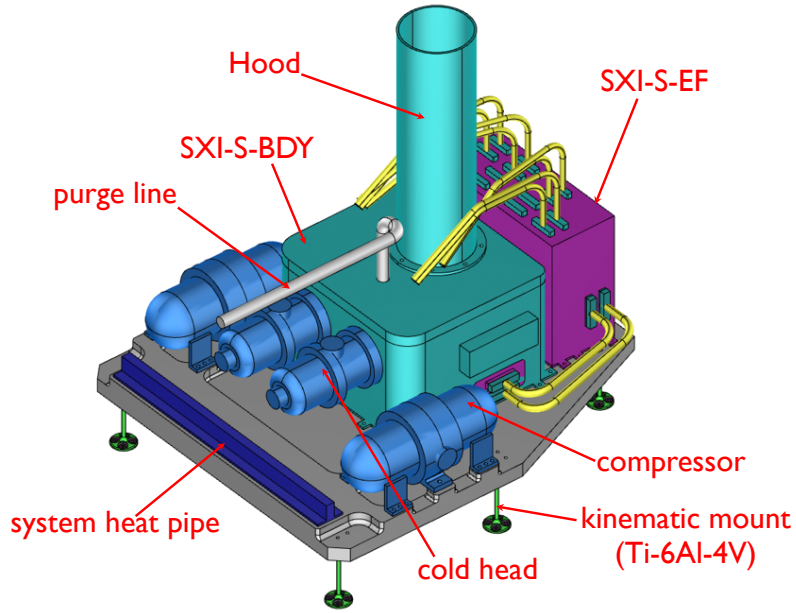

図 3.3: SXI システム全体の構造図 [17]。CCD 素子は中央のボディ内に格納される。SXT で集光した X 線は図の上方から鏡筒を通って素子に入射する。冷凍機 (SXI-S-1ST) は側面に取り付けられる。ドライバーボードはボディ横 (SXI-S-FE) に配置される。

3.1.5 SXI-MXS

SXI-MXS は衛星の lower パネル (SXT-I と SXI-S の間に位置する) に配置される。SXI-S に対し較正用の X 線を生成し照射する役割をもつ。「すざく」XIS では較正線源を搭載し、エネルギー分解能やゲインの時間依存性は較正線源を利用して、位置依存性は天体を利用して較正しているが、天体を利用した較正では実際のところ充分な統計が得られておらず、真の X 線エネルギーもわからない。SXI は XIS よりも視野が広くなり、較正に天体を利用すると他のターゲットの観測時間を圧迫してしまう。そのため、MXS を定期的に CCD 全面に照射することで時間依存性と位置依存性の両方を較正する計画である。

3.2 SXI の要求性能

SXI の要求性能および仕様を 表 3.1 にまとめておく。5.9 keV でのエネルギー分解能は 150 eV 以下を目指す。素子全面を使って露光時間 4 秒、つまり時間分解能 4 秒を目指している。その間に次の撮像データで上書きされることなくデジタル系がデータ収集を終えなければならず、SpaceWire ネットワークでのデータ速度がトータルスループットで 8.8 Mbps より速くなければならない。

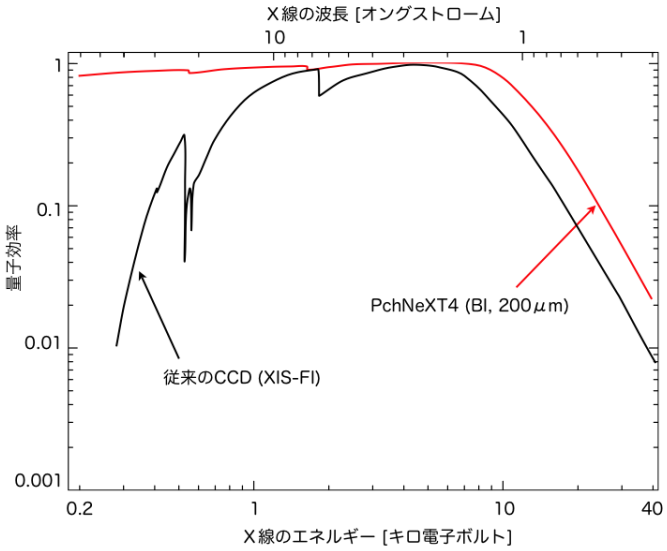

図 3.4: SXI で用いる CCD 素子 Pch NeXT4 の量子効率 [16]。「すざく」XIS-FI と比較すると低エネルギー側、高エネルギー側とも検出効率が向上している。

図 3.5: SXI で用いる CCD 素子のプロトタイプ Pch 2K4K [18]。左方にある茶色の配線がフレキシブルプリント配線板である。AR コート (反射防止膜) のため CCD の表面は青く見える。

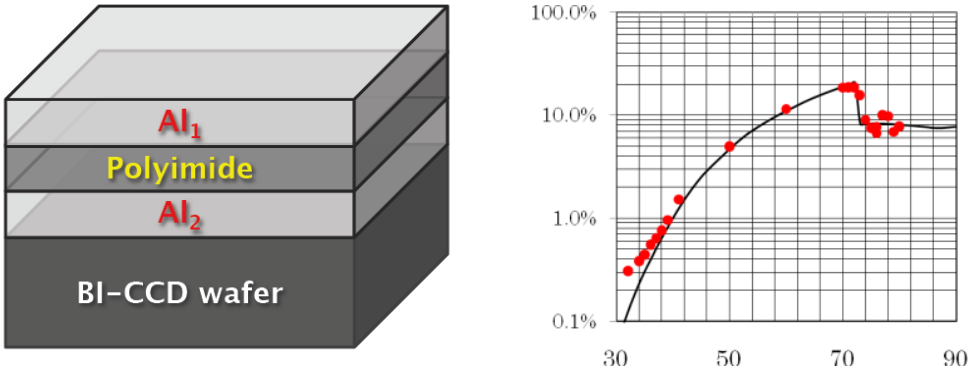

図 3.6: (左) OBL の構造 [19]。上から厚さ 800 Å のアルミニウム、厚さ 1200 Å の polyimide、厚さ 800Å のアルミニウムを蒸着する。(右) OBL の紫外線透過率 [19]。縦軸は透過率、横軸は紫外線のエネルギー (eV) を表す。実線は透過率曲線のモデルを表し、CCD を使った測定結果をプロットしている。70 eV 付近では Al の L 吸収端により透過率が低下する。

表 3.1: SXI の要求性能 [21]

エネルギー帯域	0.4 – 12 keV
CCD チップ	浜松ホトニクス社製 Pch NeXT4 (P チャネル型裏面照射 CCD)
転送方式	Frame Transfer 型
画素サイズ	24 μm × 24 μm
画素数	1280 × 1280
各チップ面積	31mm × 31mm
チップ数	4
通常露光時間	4.0 秒
SpaceWire 転送速度	8.8 Mbps
エネルギー分解能	$<$ 150 eV @ 5.9 keV
空乏層厚	$>$ 200 μm
冷却温度	-120 °C
耐用年数	$>$ 5 years

第4章　衛星内の次世代情報処理系 SpaceWire

4.1　SpaceWire とは

人工衛星の開発は費用と時間がかかる。これは、塔載品では宇宙向けの特殊資材を用いるため部品・材料費がかさみ、打ち上げまで多くの性能試験や行程を経るため長い開発期間を要する。特に制御やデータ処理のために CPU を備えた機上コンポーネントと絶えず通信を行う必要がある検出器は、通信仕様を衛星ごとにあるいは検出器ごとにカスタム製作されてきたのが典型である。そのため、新しい衛星を作るとなると再び多くのデバッグや打ち上げ前の機能試験を強いられることになってしまう。

そこで、検出器や衛星の壁を取り払った汎用のデータ交換手段を目指した規格が ESA (欧州宇宙機関)、 JAXA (宇宙航空研究開発機構)、 NASA (アメリカ航空宇宙局) などを中心としたワーキンググループで現在策定されている。これは SpaceWire (SpW) と呼ばれ、策定には他にも多くの大学や企業が参加している。設計思想として重要視されているのは、信頼性、簡潔性、冗長性、汎用性、低消費電力などである。ASTRO-H のように複数の検出器を塔載する衛星でも、注意深く開発された規格を全面的に採用することで開発期間が短縮できる上、電力もコストも削減できる。SpaceWire によって、検出器の開発と通信インターフェイスの開発を分離することができ、将来的には USB (Universal Serial Bus) のような Plug & Play 機構も視野に入っている。

4.1.1　SpaceWire プロトコル

SpaceWire は OSI 参照モデルのうち、物理層、データリンク層、ネットワーク層、トランスポート層にまたがって定義されている。データ転送レートは 2–400 MHz で可変となっており、様々な機器に柔軟な対応が可能である。信号伝送には LVDS (Low Voltage Differential Signal) 規格を採用している。コネクタは micro D-sub 9 pin を用いる。ケーブルの模式図及びピンアサインメントは 図 4.1 の通りである。また、消費電力を低くすることも可能である。ケーブルは LVDS 信号線のシールド・ツイストペア 4 組とバンドルシールドで構成されている。データの符号化の方法としては、Data-Storobe (DS) encoding を採用している。図 4.2 のように、各 LVDS 信号線のうち Data 信号と Strobe 信号の XOR をとることで Clock を再現できる。

SpaceWire を流れる情報は原則パケット化され、パケットは宛先 (Destination)、パケットの中身 (Cargo)、パケット末尾 (EOP) から成る。SpaceWire は複数のノードを介して通信するネットワークを前提としており、ルーティングの方法としてロジカルアドレッシングとパスアドレッシングの二つがある。ロジカルアドレッシングは、IP アドレスのようにノード一つ一つに固有のアドレスが割り当てられる。一方、パスアドレッシングではあるノードから別のノードまでの経路を各経由ノードのポート番号で表現する。このようなルーティング手法により、自由なネットワークトポロジーを構築することができる。そのため、回線が混雑していたり、何らかの理由で断絶した場合でも迂回により情報を届けることが可能である (図 4.3)。

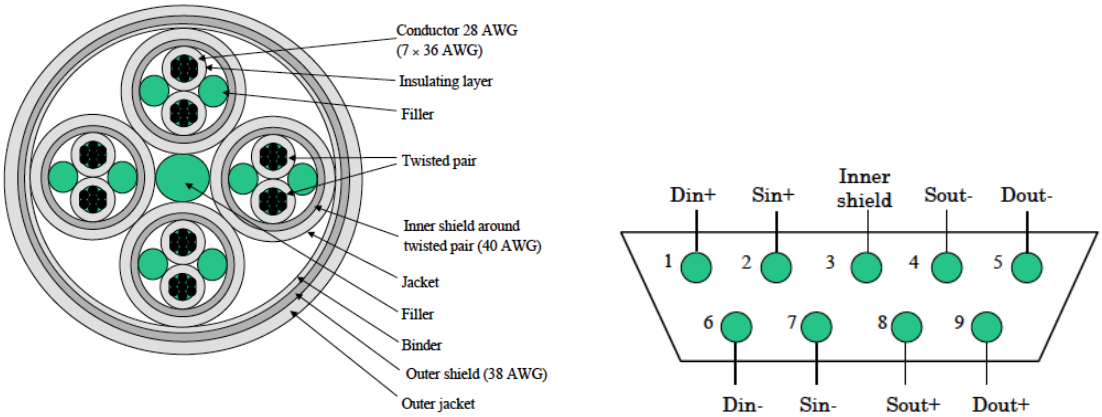

図 4.1: SpaceWire のケーブル構造 (左) と micro D-sub 9 pin のピン配置 (右) [23]。LVDS の信号は Data (D) の in と out、Strobe (S) の in と out の計 4 組ある。“Inner shield” がは内部でグランドに接続され、Sout と Dout のシールドに接続される。

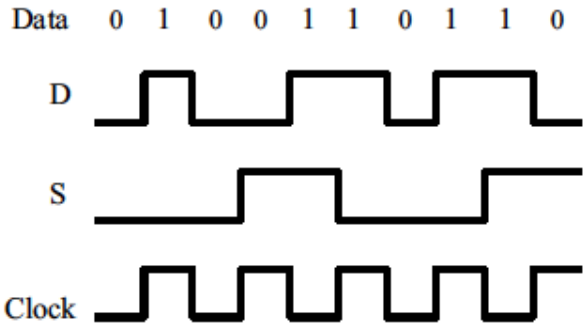

図 4.2: DS エンコーディングによるクロックの再現の模式図 [24]。Data 信号 (D) と Strobe 信号 (S) の XOR をとることで再現が可能である。

4.1.2　RMAP

SpaceWire で接続された相手との通信方法の一つとして、RMAP (Remote Memory Access Protcol) が規定されている。これは SpaceWire プロトコルのうち上位側で定義されるプロトコルである。外部に対するメモリマップが定義された機器に対し、データのやりとりやレジスタの制御は “read” もしくは “write” のコマンドで行われ、それぞれメモリ上のアドレス情報を与えればそのアドレスに保存された値を読み書きしたり SpaceWire 通信の設定を行うことが可能になる。

RMAP の理解の上で必要なキーワードは以下の通りである。以後、本文で 1 byte = 1 octet とする[1]。

- Source
  RMAP アクセスを開始するノードのこと。本論文では後述する SpaceCube が該当。
- Destination
  RMAP アクセスの目的地となるノードのこと。本論文では後述する DE I/F が該当。

[1] octet は 1 octet = 8 bit という単位である。

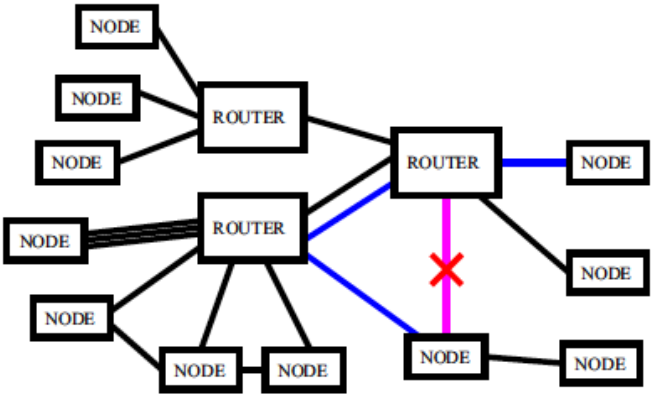

図 4.3: SpaceWire ネットワークの例 [24]。仮に赤で示された区間が不通になっても、ヘッダの宛先情報を工夫することで青で示された経路へ迂回し情報の伝達をすることが可能である。

- Source Logical Address 及び Destination Logical Address
  Source ノード、及び Destination ノードがもつロジカルアドレスのこと。ロジカルアドレスは、ロジカルアドレッシングを行う際に用いる各ノード固有のアドレスである。

- Destination Key
  Destination ノードが RMAP コマンドを受信した際に、そのコマンドを実行してよいかどうか判断するために用いられる認証キーの役割をもつ。Source ノードは予め Destination ノードが受理する Destination Key を把握している必要がある。Destination が受理されなかった場合、エラーを示す RMAP リプライが Source ノードに返される。

- Header CRC 及び Data CRC
  ヘッダやデータの最後に付けられる、Cyclic Redundancy Check code と呼ばれる 1 byte の値。これは Source ノードで所定の演算を行い値を付記する。Destination ノードでは受信したパケットに対し再計算を行い Source から送られてきた値と比較することで、伝送されてきたパケット内容の正誤を判定することが可能である。

パケットには、コマンドを送る際のパケット (Command Packet) と、その返事のパケット (Reply Packet) の 2 種類がある。実際には図 4.4 のように、Destination ではパケットの翻訳、実行の後にリプライパケットを生成し、コマンドで要求された内容の返事を Cargo に詰め込みリプライとして返す。

4.1.3 SpaceWire を使った衛星計画

SpaceWire を衛星全体に使うのは、日本の大型計画では ASTRO-H が初となる。2009 年には、SpaceWire 技術の実証を一目的とした日本の小型衛星 SDS-I が打ち上げられている。今後の計画として ASTRO-H の他に 水星探査機 BepiColombo/MMO (2014 年打ち上げ予定、日欧共同) や、ほかにも数多く小型衛星計画が存在する。

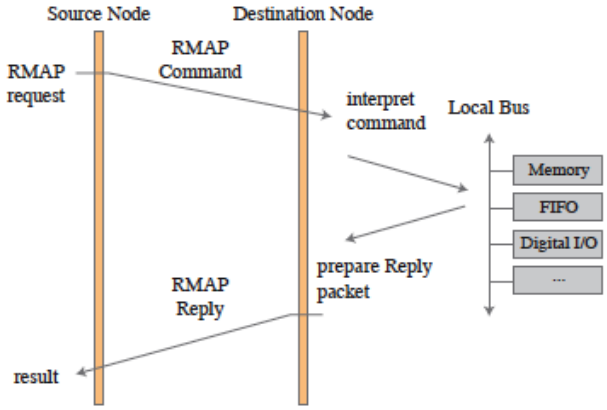

図 4.4: RMAP パケットによるコマンドとリプライの概観 [25]。図の上から下の方向へ時間、手順とも経過していく。

4.2 SpaceWire 通信のためのハードウェア

SpaceWire ネットワークを用いた検出器読み出し系の開発には、SpaceWire の仕様に則ったハードウェアが必要である。シマフジ電機と JAXA は共同で CPU ユニットとして SpaceCube1 を、検出器などとのデジタル I/O として SpW Digital I/O Board を開発した。これらは検出器開発において標準的に実験室で用いられている。SpW Digital I/O Board は本研究では使わないため文献の紹介に留める [25]。

4.2.1 SpaceCube

SpaceCube1 は SpaceWire インターフェイスをもつコンピュータである。民生機器の技術が応用されており、手軽に SpaceWire 通信環境を構築することができる。CPU は MIPS IV アーキテクチャの VR5701 を搭載し、OS はリアルタイム性に優れた T-Kernel を採用している。キーボードやディスプレイを接続すると普通のコンピュータとして単独で使うこともできるが、RS232C のクロスケーブルを用いてシリアルコンソール (POSIX OS 上の gterm など) から制御するのが一般的である。SpaceWire の接続口として D-sub 9 pin が 3 つ用意されている。SpaceWire の仕様 (4.1.1 節) とされている MDM 9 pin は高価なため、実験室レベルで SpaceWire を利用する場合には比較的安価な D-sub 9 pin で代用することが多い。SpaceCube1 上で走らせるソフトの開発言語として C もしくは C++ が用いられる。編集とコンパイルは POSIX OS で、実行は SpaceCube1 で行うクロスコンパイルのスタイルで開発する。

SpaceCube1 は地上試験用の装置 (GSE: ground support equipment) であり、ASTRO-H には CPU ボードとして SpaceCard (三菱重工業製) が搭載される。ほかにも NEC 東芝スペースシステムからは SpaceCube2 と呼ばれる搭載用 CPU ユニットが開発されている。本論文では、SpaceCube1 のことを単に SpaceCube (SpC) と呼ぶことにする。

4.2.2 Universal SpW Board

Universal SpW Board は検出器からのデジタル信号処理に加え、SpaceWire ネットワークを利用したデータ読み出しを実現する I/O ボードで、三菱重工業と JAXA によって開発された。Xilinx 製

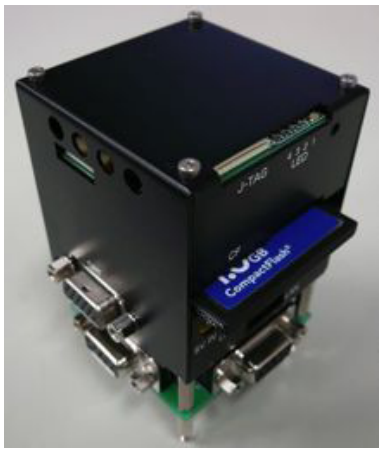

図 4.5: SpaceCube

CPU	VR5701
Flash ROM	16 MB
DRAM	DDR SDRAM 64 MB
入出力	SpaceWire, RTC, CF, CRT (1024 × 768), USB1.1, Ethernet (100BASE), Audio (Stereo), RS232C, JTAG I/F (デバッグ用)
電源	5V
寸法	52 mm × 52 mm × 55 mm

表 4.1: SpaceCube のスペック

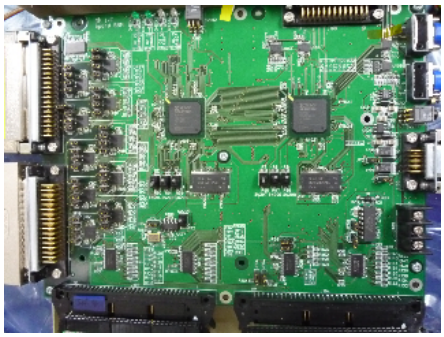

図 4.6: Universal SpW Board

FPGA	Xilinx XC3S400 2 個
SDRAM	32 MB (各 FPGA に一つずつ)
Flash ROM	16 MB
SpaceWire I/F	2 ポート (micro D-sub 9 pin)
検出器側 I/F	D-sub 50 pin, D-sub 37 pin
システムクロック	32 MHz
電源	3.3 V, 5.0 V の 2 系統
寸法	220mm × 170mm

表 4.2: Universal SpW Board のスペック

の FPGA (Field Programmable Gate Array) を 2 個搭載している。一方は SpW FPGA と呼ばれ、SpaceWire 機能が実装されている。もう一方は User FPGA と呼ばれ、こちらには検出器ごとに必要な処理機能をもったロジックをユーザーが作って試験することが可能である。また各 FPGA には FPGA ロジック保存用の PROM も搭載しているほか、16 MB の SDRAM が備え付けられており、検出器からの読み出しデータなどを一時保存することが可能である。Universal SpW Board は SXI の AD 変換部と SpaceWire 通信の二つの新しい機能実証のために製作された基板であり、ASTRO-H にはこれをもとに設計された Mission I/O Board (MIO Board) が搭載される。前述の FPGA による汎用的な扱いが可能であるため、各検出器に MIO Board を用いることで搭載品の仕様を共通化することができる。また検出器側のインターフェイスは LVDS であり、チャンネルごとにジャンパで受け側か送り側かを選択することができる。

4.3 SpaceWire 通信のためのソフトウェア

東京大学の湯浅らによって、SpaceCube で RMAP 通信を行うためのパケットを生成するライブラリ “SpaceWire/RMAP Library” が開発された [26]。前述の SpaceWire プロトコル、RMAP プロトコルに対応している。ソースコードは C++ 言語で書かれており、日本スペースワイヤユーザー会で公開されている。現在のところ、Source 側は SpaceCube のみ対応であるが、Destination 側については SpaceWire 及び RMAP の両プロトコルに準拠したものであれば原理的には通信が可能で

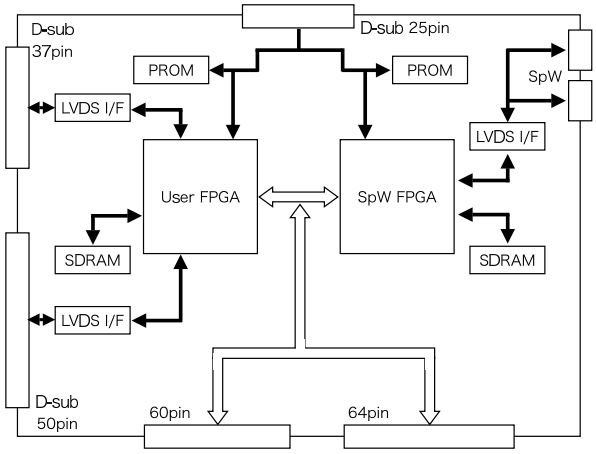

図 4.7: Universal SpW Board の回路ブロック図。左が検出器側、右が SpaceWire 側である。上方の D-sub 25 pin コネクタは FPGA 及び PROM へのロジックロード用で、下方の 2 つのコネクタは別の Universal SpW Board とバスインターフェイスを形成する際に使う。

ある。現在のところ、Universal SpW Board や SpaceWire Digital I/O Board、シマフジ電機製の SpaceWire Router などで動作が実証されており、実際に検出器開発に使われている。

4.4　SpaceWire を利用した検出器の開発

検出器独自の機構に加え、前述のハードウェアとソフトウェアを組わ合せることで SpaceWire を利用した検出器の読み出し系を構築することができる。利用者が開発するのはセンサ部など検出器独自の機構のほかに User FPGA に実装するロジックと、SpaceCube で動作させるデータ収集ソフトである。それぞれに、検出器にとって必要な機能をカスタムしていけばよい。本研究では、データ収集ソフトウェアの開発を中心に推し進め、CCD 読み出しシステム全体を構築した。

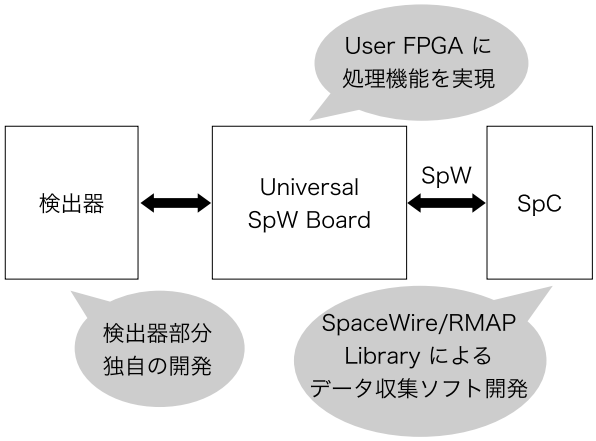

図 4.8: SpaceWire を利用した検出器開発の簡略図。吹き出し部分が開発すべき項目である。

第5章　SXI BBM デジタルデータ収集系の開発

ASTRO-H SXI BBM を利用し、SpaceWire 通信によるデータ収集系を構築した。本章では、まず SXI BBM の構成を述べ (5.1 節)、次にデータ収集システムの動作へ要求される項目を述べ (5.2 節)、5.3 節 以降では具体的な開発・検証内容を取り上げる。なお、データの流れの方向の表現として、DE I/F を上流、POSIX OS を下流とする。

5.1　SXI BBM の構成

ASTRO-H SXI の試作実験モデルとして、SXI チームは breadboard model (BBM) を 2007 年度に設計・製作した。この BBM の動作検証結果を受け、搭載モデルの詳細設計及び製作を行う。

図 5.1 に、BBM 全体のブロック・ダイアグラムを示す。第 2 章 で述べたように、CCD は駆動と読み出しにクロックが必要である。これらに必要なクロックのパターンを生成するのが Sequencer である。Driver Board は Sequencer からのタイミングをもとに CCD へ駆動信号を供給し、CCD からは画素毎の電荷量が図 2.11 のような波形のアナログ信号で出力される。各画素で生成された電子の数は floating level と signal level の電位差として伝達される。出力波形は、ビデオボード上の ASIC に実装された ΔΣ モジュレータ (ΔΣ 型 ADC 前半部) によって 1 画素あたり 155 bit のビットストリームに変換され、DE I/F に供給される。DE I/F では、User FPGA に実装されたデシメーションフィルタ (ΔΣ 型 ADC 後半部) で波高値を 12 bit 値にたたみ込み、Sequencer から供給される 4 bit 値のピクセル種別情報と組み合わせ 16 bit の値として SDRAM に一時保存する。SDRAM に保存されたデータを SpaceCube が RMAP/SpaceWire 通信によって収集していく。

BBM における特徴としては、AD 変換の処理をビデオボードと DE I/F にまたがって行い、ビデオボードには大阪大学が開発してきた第 4 世代の ASIC チップを利用する [14]。また、デジタル系では SpaceWire ネットワークを利用したデータ収集を行う。SpaceWire を X 線 CCD 検出器に使うのは SXI が世界で初めてである。

以下、図 5.1 の構成要素についてそれぞれ紹介する。まず BBM に用いる回路基板について述べる (5.1.1 節 – 5.1.4 節)。この BBM システム評価のために用いる CCD 素子について 5.1.5 節 で、基板からデータを収集するのに用いる計算機について 5.1.7 節 で述べる。

5.1.1　Driver Board

ドライバーボードは CCD へ供給する駆動信号を生成する。タイミングの基準となるクロックが Sequencer から供給され、DA コンバータと高速アナログスイッチの組み合わせで CCD の駆動に必要な信号を生成し Head 基板へ送出する。信号の種類を 表 5.1 にまとめる。DAC 設定は Sequencer からの LVDS 信号によって行う。配線配置の都合上、Driver Board からの出力はビデオボードを経由して Head 基板へ供給されるが、ここでは駆動信号の処理は何も行っていない。

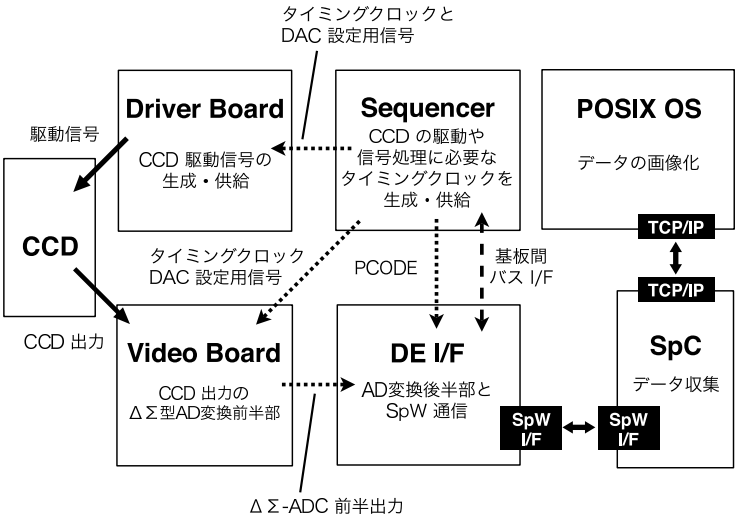

図 5.1: SXI BBM の構成。矢印はそれぞれ、実線がアナログ信号、点線が LVDS、破線が LVTTL を表す。Sequencer は DE I/F から基板間バスを経て供給されるマスタークロックを基準に動作する。図 4.8 で描かれた「検出器」に対応している部分に該当するのが CCD 素子、Driver Board、ビデオボード、Sequencer である。SXI BBM は SpaceWire を利用した検出器開発のコンセプトに沿った設計になっている。

5.1.2 Video Board

BBM 用ビデオボードでは CCD 出力の AD 変換のうち前半部を担当する。ビデオボードには大阪大学が開発した、CCD イメージセンサ高速信号処理用 ASIC “MD02” が搭載されている。ASIC における処理は以下の通りである。CCD からの出力波形はまずプリアンプで (1) 振幅を 10 倍に増幅し、(2) 選択的に signal level のオフセット調節を行う。次に信号は Sequencer からのサンプリングクロックに合わせて相関多重サンプリングされ、ΔΣ モジュレータへと供給される。

ΔΣ モジュレータは signal level と floating level の電位差が ±200 mV までの範囲で線形性が保たれている。signal level の深さは CCD 素子で発生したキャリア電子の数に対応しているが、10 倍増幅後の信号が電位差 200 mV を超えている場合はオフセットを与えることで調整する。増幅率、オフセット電圧とも内蔵 DAC の設定で決定する。オフセットは 5 bit 列 ($b_0 - b_4; b_0$ が LSB) で表現され、オフセット電圧値 ($V_{\rm DAC}$) は以下の式で表される:

$$V_{\rm DAC} = \frac{30\ {\rm fF}}{1\ {\rm pF}} \times (16V_4 + 8V_3 + 4V_2 + 2V_1 + 1V_0 - 31V_-), \tag{5.1}$$

$$V_i = \begin{cases} V_+ & \text{if } b_i = 1 \\ V_- & \text{if } b_i = 0 \end{cases} \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4).$$

ここで $V_+ = 1.2$ V, $V_- = 0$ V である。すなわち、CCD 出力波形の signal level と floating level の電位差を v (V) とすると、ASIC プリアンプ出力時点での電位差は $10v - V_{\rm DAC}$ になる。

サンプリングは odd モジュレータと even モジュレータの二つで交互に行われる。それぞれ奇数番目の画素及び偶数番目の画素の処理を担い、サンプリングを並行して行う。どちらのモジュレータを使うかを決める制御端子として、Sequencer から odd 信号が供給される。odd 信号が High の場合は

表 5.1: Driver Board が生成する駆動信号

略称	電極名	電圧の種類
PV	Vertical register clock	縦転送のための電極用電圧 †
TG	Transfer gate	縦転送から横転送の電極への橋渡しの働きをする電極用電圧
PH	Horizontal register clock	横転送のための電極用電圧 ‡
SG	Summing gate	横転送してきた電荷を FDA 変換部に受け渡す電極用電圧
OG	Output gate	SG と FDA 変換部の間で電荷を引きつける電極用電圧
RD	Reset drain	FDA システム用電圧
RG	Reset gate	FDA システム用電圧
OD	Output transistor drain	FDA システム用電圧
BB	Back bias	バックバイアス用電圧

† Nch-mini CCD では P1V と P2V の 2 相式である。
‡ Nch-mini CCD では P1H と P2H の 2 相式である。

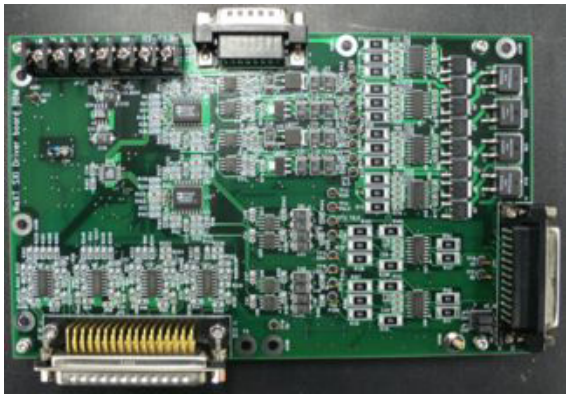

図 5.2: Driver Board の写真

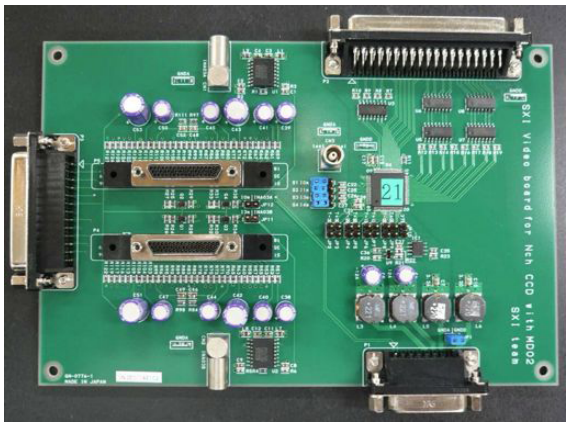

図 5.3: Video Board の写真

奇数番目の画素として扱われる。signal level と floating level でそれぞれ 35 回のサンプリングを行い、1 画素あたり 155 bit のシリアル信号として DE I/F に供給する。

ASIC にはプリアンプ、ΔΣ モジュレータの一連の機能が 4 チャンネル分 (chain 0–chain 3) 用意されており、CCD 出力を 4 つのチェーンに分岐させ同時に処理することが可能である。

なお、搭載用ビデオボードには ASIC のほかに FPGA も搭載される。この FPGA では、後述する DE I/F の User FPGA で行う ΔΣ 型 AD 変換の後半処理を行う。これにより、搭載用ビデオボードでは AD 変換に必要な全てのプロセスを担うことになる。

5.1.3 DE I/F

DE I/F は Universal SpW Board の User FPGA に SXI 用の処理機能を実装したものである。User FPGA に実装される機能を図 5.4 に示す。DE I/F は主にデジタルフィルタ (ΔΣ 型 AD 変換後半処理) と、SpaceWire ネットワークとのインターフェイスとしての役割をもつ。後者は SXI-PE の機能の一部である。User FPGA には、ビデオボードからの供給される 1 画素あたり 155 bit の ADC 出力を 12 bit のデジタル値に変換するデジタルフィルタ機能が実装されている。SXI ではこの

処理部を「デシメーションフィルタ」と呼んでいる。さらに、4 bit で表現されるピクセル位置情報 (PCODE) が Sequencer から供給される。PCODE を波高値 12 bit の上位に付け加え、1 画素あたり 16 bit のデータとして DE I/F 上の SDRAM に保存される。Universal SpW Board には SDRAM が 2 つ用意されている (User FPGA 側及び SpW FPGA 側)。保存先は後述のレジスタで選択することができる。ビデオボードからは 8 系統のシリアル出力が供給される (4 つのチェインそれぞれに odd と even 2 つのモジュレータ) ため、デシメーションフィルタ機能も 8 系統分用意されている。フライト品では User FPGA においてイベント抽出も行う予定であるが、BBM での実装は省略されている (図 5.4)。

SDRAM に保存されたデータは、Universal SpW Board の基本機能である SpW インターフェイスを利用し、SpaceCube が収集する。DE I/F の全ての機能は RMAP 空間上に対応づけられており、予め定義された SDRAM のアドレスを指定し RMAP アクセスでデータを収集したり、デシメーションフィルタに必要な設定や制御を行う。DE I/F にはデータの取り込み手法としていくつかレジスタが設けられている。それらのうち、本論文での開発に必要となるものは以下の通りである。

- データ取り込み設定
  DE I/F に搭載されている SDRAM には、1 アドレスに 16 bit 幅が割り当てられている。メモリへのアクセス方法として、DE I/F ではアドレス指定制御と FIFO (First-in First-out) 制御が用意されているが、FIFO 制御が実装されているのは SpW FPGA 側のみである。アドレス指定制御では、平面駐車場のように区切られたスペースに車が出入りするのと同様にメモリのアドレス一つ一つに対し独立にアクセスでき、電源を切ったりメモリリセットを行わない限り複数回読み出せる。一方 FIFO 制御は、料金所で進入してきた車を順番に処理するのと同じようにメモリ空間に書き込まれた順番に読み出しを行い、値は読み出されると削除される。なお、この制御指定は RMAP アクセスのアドレスカウンタのインクリメント指定とは独立なものである。デフォルトでは FIFO 制御として設定される。FIFO 制御では読み出した値は逐一削除されてしまうため、何らかの理由で SpW 通信が断絶した場合等は下流の計算機がデータを取りこぼしてしまう可能性がある。本論文では、まず下流の計算機が安定かつ確実にデータを取得する必要があり実現するまでは FIFO 制御は不向きである。そのため、以降特に言及しない限りアドレス指定制御を選択することとする。

- デシメーションフィルタ機能フレーム数設定
  User FPGA の デシメーションフィルタ機能では、画像 1 枚を 1024×1024 画素として扱う。このレジスタでは、デシメーションフィルタを停止するタイミングを 1 フレーム、2 フレーム、連続 (無限に収集し続ける) の 3 種類から選ぶことができる。デフォルトでは 1 フレームに設定される。本論文では、動作の基本となる 1 フレームで評価・試験を進めてきた経緯があり、以降特に言及しない限り 1 フレームを選択していることとする。

- データ保存先設定
  デシメーションフィルタ機能で生成された 1 画素あたり 16 bit のデータは User FPGA 側の SDRAM か、SpW FPGA 側の SDRAM に保存することができる。デフォルトでは SpW FPGA が選択されている。本論文では、以降特に言及しない限り SpW FPGA を選択していることとする。アドレス指定制御の場合は User FPGA を選択しても差し支えないのだが、前述の通り FIFO 制御は SpW FPGA にのみ実装されており、将来データ収集が安定し FIFO 制御へ以降することを想定してデータの保存先を SpW FPGA に設定している。

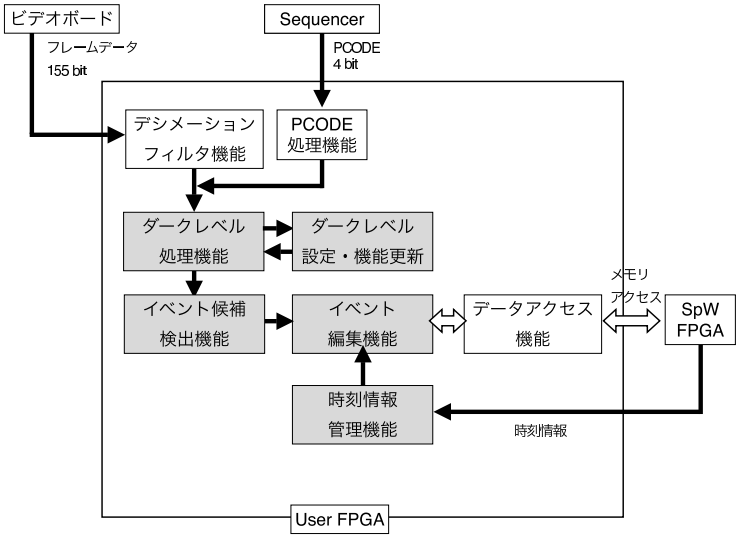

図 5.4: DE I/F User FPGA のブロックダイアグラム。フライト仕様では User FPGA でイベント抽出を行うこととなっているが、SXI BBM では灰色で示された部分が省略されており、イベント抽出は行っていない。

5.1.4 Sequencer

Sequencer は SXI-PE の機能のうち各種動作に必要なタイミングクロックをビデオボードとドライバーボード、DE I/F へ供給する。ハードウェア構成は DE I/F と同じく Universal SpW Board である。User FPGA に Sequencer としての処理機能を実装している。SpW FPGA は特に役割をもたないため、User FPGA との衝突を避けるための最小限の機能を実装している。DE I/F へは 5.1.3 節で述べたように PCODE を供給する。PCODE の定義は 表 5.2 の通りである。本論文では大阪大学の穴吹直久氏が開発したロジックを用いる。

現状の Sequencer ロジックでは 1 画面の露出ごとに縦転送を止めていない。そのため、電荷の転送に要する時間だけが露光時間となる。縦転送は一回あたりおよそ 2.5×10^{-6} 秒、横転送は一画素あたり 1.0×10^{-6} 秒かかるので、1 フレームではおよそ 4.18 秒となる。

5.1.5 CCD 素子

大面積の CCD 素子は高価であるため、BBM 実験では搭載品の要求スペックよりも画素数を少なくした mini CCD と呼ばれるものを使う。本実験では、浜松ホトニクス社製 Nch-mini CCD を使用する。スペックは 表 5.1.5 の通りである。画素サイズは 24 μm 四方であり、2.2.3 節 で見積ったように電子雲の広がりは 0.4 μm 程度であるため X 線を点として検出できる。受光画素は水平 512 × 垂直 616 ピクセルある。

5.1.6 Head 基板

Head 基板は CCD パッケージの電極形状に合ったソケットと、ビデオボードへのインターフェイスコネクタをもち、駆動や CCD 出力信号を電極配置に合うようやりとりすることができる。信号処理は一切行っていない。

表 5.2: PCODE の定義とその値

PCODE				名称	略称	説明
bit 3	bit 2	bit 1	bit 0			
1	0	0	0	Inactive Pixel	IA	意味のあるデータをもたない画素
0	0	0	1	Frame Sync	FS	フレームの先頭
0	0	1	0	Line Sync	LS	行の先頭
1	0	1	1	Active Pixel	AP	有効なデータをもつ画素
0	1	0	0	H-overclocked Pixel	HOC	水平方向に over clocking した画素
1	1	0	1	Line End	LE	行の末端
1	1	1	0	Frame End	FE	フレームの末端
0	1	1	1	V-overclocked Pixel	VOC	垂直方向に over clocking した画素

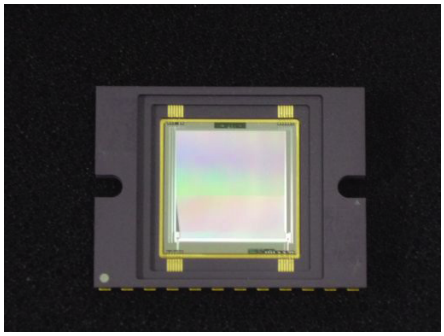

図 5.5: Nch-mini CCD

表 5.3: Nch mini CCD の主なスペック

照射面	表面照射型
転送方式	フルフレーム型
画素数	512×616
画素サイズ	$24\ \mu\mathrm{m} \times 24\ \mu\mathrm{m}$
チップ面積	$12.3\ \mathrm{mm} \times 14.8\ \mathrm{mm}$
垂直クロック	2 相
水平クロック	2 相
変換係数	$3.2\ \mu\mathrm{V/e^-}$

5.1.7　SpaceCube 及び POSIX OS コンピュータ

SpaceWire を利用してデータを収集するため、SpaceCube は SXI BBM で必要な構成要素の一つとなる。SpaceCube に搭載されている Ethernet インターフェイスを使って実験室内の POSIX OS コンピュータと通信し、画像ファイルの作成などを POSIX OS コンピュータで担う。POSIX OS コンピュータには Debian GNU/Linux 4.0 を使用している。

5.2　データ収集システム構築のロードマップ

前節で述べた SXI BBM を構成するハードウェアが個々に開発された。DE I/F を使った SpaceWire 通信の機能実証は行われていないため、通信開通と性能評価を行い、最終的に BBM 全体を組み合わせてデータ収集システムを完成させていく。

DE I/F の User FPGA には RMAP でアクセスできるレジスタが用意されており、規定値を書き込むことで設定や処理を行う。同時にメモリ空間に対しても RMAP でアクセスできるため、下流の計算機で動作させるソフトウェアで User FPGA 内の処理開始や状態監視とデータ収集を一括して担うことができる。デシメーションフィルタの開始コマンドを User FPGA へ与えると、処理を行っている間は常にフラグが立っている。ステータスレジスタを監視し、処理が終了したら SDRAM に保存されたデータを RMAP 通信で収集する。データ収集が終わったら再びデシメーションフィルタを開始させる。以上の動作を繰り返し、連続的に撮像データを収集していく。

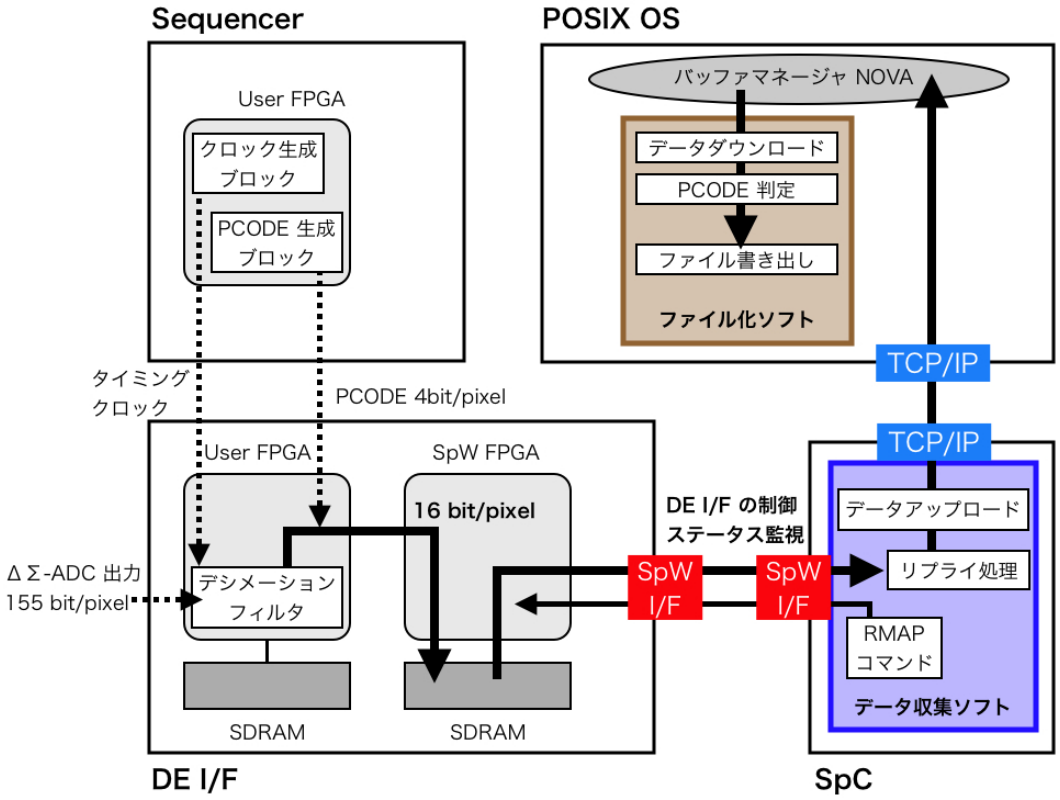

図 5.6: デジタルデータ収集系全体の構想。User FPGA ではビデオボードからの CCD 出力信号と Sequencer からの PCODE を併せて 16 bit のデータとし、SpW FPGA の SDRAM に一時保存する。データ収集ソフトはデシメーションフィルタの開始やステータス監視、データ読み出しを RMAP コマンドで行う。SDRAM に保存されたデータはデータ収集ソフトが回収し、実験室内の Ethernet を介して POSIX OS のバッファマネージャへ送る。POSIX OS にはバッファマネージャに溜まったデータをイメージファイルに変換するファイル化ソフトを構築する。

このようなプロセスを実現するデータ収集ソフトを開発する。このソフトは SpaceWire/RMAP Library を利用して開発する。また、収集したデータをイメージファイルに変換するために、データ収集ソフトとは別にファイル化ソフトを構築する。データ収集ソフトとファイル化ソフトの間のデータハンドリングには、NOVA と呼ばれるバッファマネージャを POSIX コンピュータで用いる。データ収集システム全体の構想は 図 5.6、データ収集ソフトに必要な処理を示したフローチャートは図 5.7 のようになる。

以上の事柄をふまえ、システムとして実現するために項目を分割し開発をすすめた。次節以降、以下のような構成で説明していく。まず SpaceWire/RMAP Library を利用して DE I/F と SpC の間の通信を確立した。次にデータ転送速度と長時間安定性の検証を行い、これらの向上のため SpaceCube を SpaceWire プロトコルと TCP/IP プロトコルの変換器とする構成に改修した (5.3 節)。そして、収集したデータを POSIX OS コンピュータでイメージファイルとして保存する機構を構築した (5.4 節)。さらに User FPGA のデシメーションフィルタ機能を動作させ、Sequencer から PCODE が意図した通りに与えられて Sequencer と DE I/F の同期が取れていることを実証した (5.5 節)。以上の項目を整理し、データ収集を連続的に行うソフトウェア sxiSpWdaq の完成とした (5.6 節)。

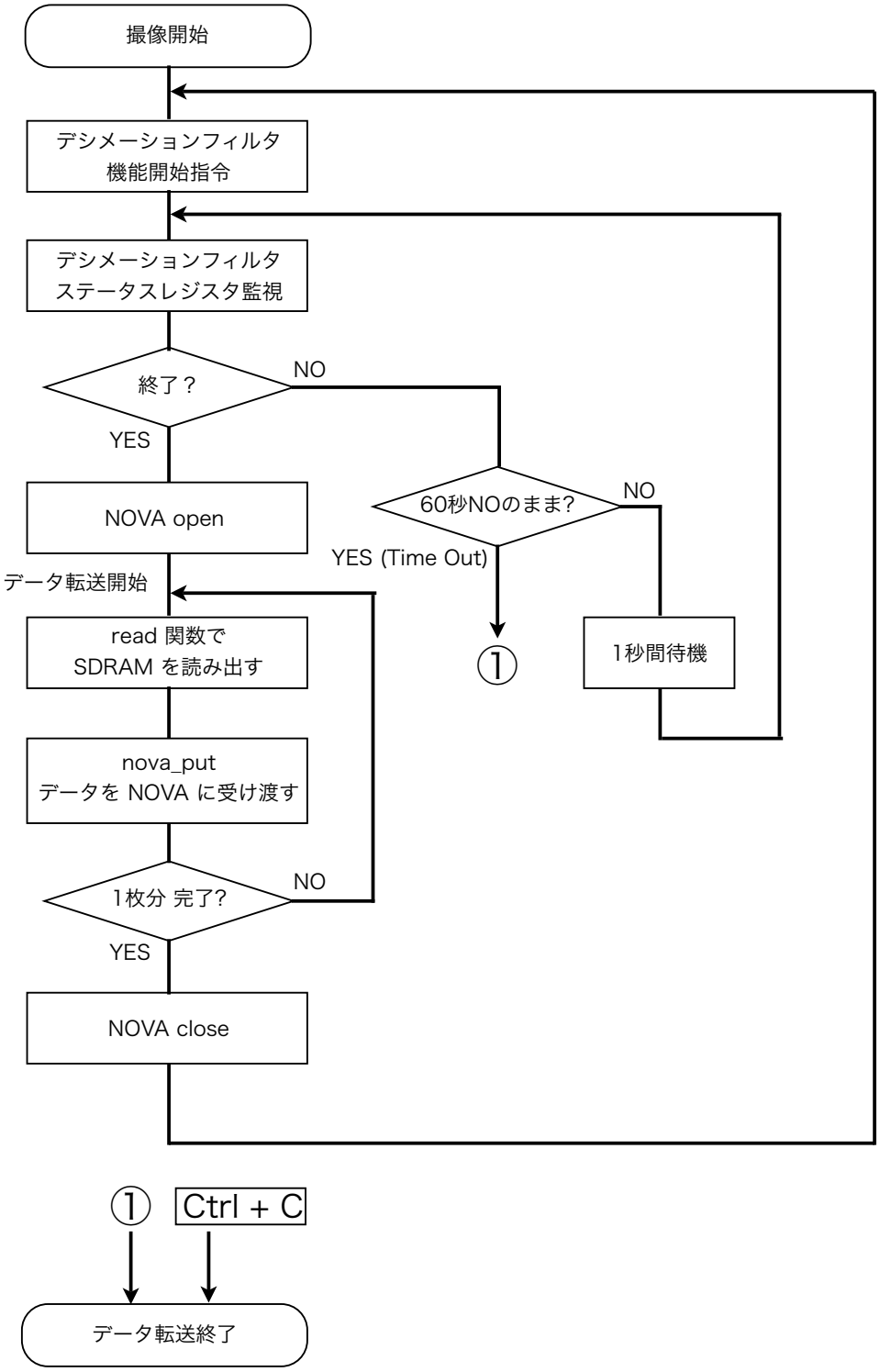

図 5.7: データ収集ソフトに求められる処理フロー。デシメーションフィルタ開始後、ステータスレジスタを毎秒チェックする。デシメーションフィルタの処理が終了したら NOVA のバッファを要求し (NOVA open)、1 フレーム分に達するまで RMAP でデータを取得し NOVA にデータへ受け渡し、NOVA バッファを解放する (NOVA close)。その後再びデシメーションフィルタをスタートさせる、といった動作が求められる。

5.3 DE I/F – SpC 間の RMAP/SpaceWire 通信

5.3.1 通信に必要な設定

SpaceWire/RMAP ライブラリ (4.3 節) を用いて DE I/F と SpaceCube の間で RMAP 通信を行う。

まず、ライブラリソフトウェアで定義が必要な通信確立のための設定を行う。4.1.2 節で述べた Destination ロジカルアドレス、Destination キー、Source ロジカルアドレス、CRC タイプの各値をソフトウェア内で定義しておく。具体的な値は Universal SpW Board で予め定義されている。これらの設定により、生成したパケットをどこへ送り、リプライをどこへ返すべきかをソフトウェアが把握したことになり、SpaceCube から SpaceWire アクセスが実現する。また RMAP アクセスの際、1 ワードあたりのバイト幅を定義しておく必要があるが、これもライブラリ変数として用意されている。Universal SpW Board では 1 ワードあたり 2 byte と決められている。

SpaceWire/RMAP ライブラリには、read コマンドや write コマンドを利用したサンプルソフト “rmaphongo” が用意されている。これはライブラリ関数として定義された read 関数や write 関数を実行し、 read 関数の場合は読み出し値をシリアルコンソールに出力するものである。これを用いて SpaceWire アクセスを試みる。

5.3.2 パケットデータの信頼性

前節で述べたような準備を行った上で、rmaphongo を用いて指定したメモリアドレスに対し意図した読み書きを行えることを確認した。1 アドレスのみの読み書きをしたときのシリアルコンソールの出力例を付録 A に記す。

続いて、複数のアドレスに渡ってデータの読み出しを行った。write コマンドで SDRAM の CCD データ保存領域に乱数を書きこみ、1024×1024 ワードに対応する 2 MB のデータをパケットあたり 4 KB ずつ読み出し、書き込んだ通りの値が読み出せるか確かめた。その結果すべてのアドレスにおいて書きこみ値と読み出し値が一致し、RMAP でデータの読み出しが正しく行われることを確認した。

5.3.3 データ転送速度の測定と改善

CCD 検出器は基本的に撮像を連続に繰り返す。撮像時間内にデータ転送を終える必要がある上、扱うデータ量が多いためデータ転送速度について検証を行った。

5.3.3.1 NEC Soft 製 IP コア搭載 SpaceCube の場合

SpaceCube の開発の経緯により、2008 年ごろまでに出荷された SpC には NEC Soft 製の IP コアが実装されている。NEC Soft 製の IP コアを実装した SpaceCube を使ってデータ転送速度の計測を試みた。

一度のアクセスで DE I/F の SDRAM から 4 KB [1]ずつ読み出し、512 回繰り返して総計 2 MB のデータ量を取得するのに要した時間は 30 秒、つまり約 0.6 Mbps であった。

[1]本論文内では、データ容量に関して 1 KiB ($= 2^{10}$ byte) を 1 KB、1 MiB ($= 2^{20}$ byte) を 1 MB など 2 進接頭辞として表記する。データ容量以外の単位では、例えば 1 Mbps $= 10^6$ bps を表すこととする。

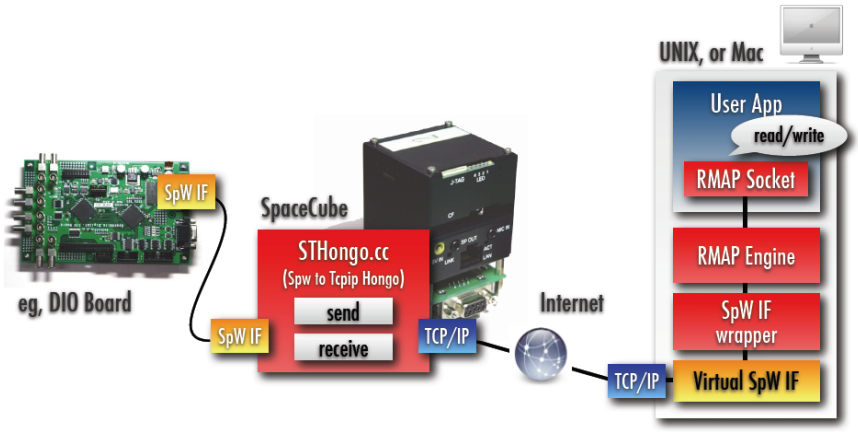

図 5.8: SpaceCube をプロトコルブリッジとして使うときの概念図 [27]

5.3.3.2　シマフジ電機製 IP コア搭載 SpaceCube の場合

一方、シマフジ電機においても SpaceCube 用の IP コアの開発が進められ、2009 年にリリースされた。シマフジ電機製 IP コアは日本スペースワイヤユーザー会で標準的に利用するのを目的として開発され、最近出荷された SpaceCube にはシマフジ電機製のものが搭載されている。このシマフジ電機製 IP コアを実装した SpaceCube を使い、前節と同じ量のデータを収集してみたところ、15 秒 (= 1.1 Mbps) を記録した。

5.3.3.3　プロトコルブリッジによるデータ転送の高速化

5.3.3.1 節、5.3.3.2 節 の測定値は、いずれも表 3.1 に示した SXI の要求性能値 (8.8 Mbps) を下回るものとなっている。SpaceCube に対応する CPU ボードとして ASTRO-H では SpaceCard を搭載し、RMAP パケットに必要な処理はハードウェア処理される。ところが、現状の SpaceCube においては IP コアに RMAP パケットの処理が実装されておらず、ソフトウェア処理に頼っている。そのためデータ転送のボトルネックになっていると考えられる。

そこで、SpaceWire/RMAP ライブラリでリリースされているサンプルソフトウェア “sthongo” を利用し、“rmaphongo” のような読み出しソフトは POSIX OS で実行するアプローチを試みた。これは SpaceCube を SpaceWire プロトコルと TCP/IP プロトコルのブリッジとして使うことができるもので、実験室内の LAN 環境に接続された POSIX OS コンピュータから透過的に RMAP 通信を行うことができるようになる (図 5.8)。そのため、SpaceCube よりもマシンパワーの強い POSIX OS へ RMAP パケットの生成や解釈などの処理を移すことができる。SpaceCube ではプロトコル変換のみを行うことになり、負担を軽減できる。

実際にこの変更を施し、5.3.3.1 節、5.3.3.2 節 と同じ容量のデータを取得したところ、4.3 秒 (= 3.9 Mbps) に向上した。さらに、一度のアクセスで読み出すデータ長を 6 KB に増量したところ 4.4 Mbps を記録した。

表 5.4: SpaceWire データ転送速度の変遷

日付	転送速度	パケットあたりのデータ長	備考
2008/09/03	0.6 Mbps	4 KB	NEC Soft 製 IP コア
2008/09/04	1.1 Mbps	4 KB	シマフジ電機製 IP コア (ベータ版)
2009/06/27	3.9 Mbps	4 KB	プロトコルブリッジ
2009/09/30	4.4 Mbps	6 KB	プロトコルブリッジ

5.3.3.4 SpaceWire データ転送速度の変遷と通信の安定性

表 5.4 に転送速度の変遷をまとめる。ここで示している値は SpaceWire 部分のみの転送速度である。現在のところ最速の 4.4 Mbps で長時間にわたりデータ収集を続けたところ、SpaceWire 通信が切断されるような障害は 26 時間を超えても発生せず、非常に安定していることを確認した。

5.4 収集データのイメージファイル化

次に、取得したデータを用い、データ収集ソフトとは別に下流側でイメージファイルを作成するシステムを構築する。

5.4.1 FITS 形式

天文学では観測データの標準的な記録フォーマットとして FITS (Flexible Image Transport System) が用いられる。画像のほかにもスペクトルやイベントデータなど、天文学で扱うデータを汎用的に扱える。FITS ファイルは ASCII テキストで書かれたヘッダとバイナリのデータ配列からなる。FITS フォーマットについては [30] が詳しい。SXI BBM においても取得したデータをイメージ FITS 形式で保存する。

5.4.2 FITS 形式のファイルを読み書きするためのライブラリ

C 言語、もしくは C++ 言語を使って FITS ファイルを容易に作成するためのライブラリ CFITSIO [31] と CCfits [32] が NASA ゴダード宇宙飛行センターからリリースされている。

CFITSIO は FITS ファイルを読み書きするためのサブルーチンライブラリで、C 言語で書かれている。CCfits は CFITSIO を C++言語に拡張するライブラリで、これらを組み合わせ C++ 言語で FITS ファイルの読み書きが可能となる。

5.4.3 バッファマネージャ NOVA

SpaceWire/RMAP プロトコルを利用したデータの読み出しソフトに CFITSIO ライブラリを組み込み、収集したデータをすぐ FITS ファイルにするのも一つの方法だが、SXI BBM ではバッファマネージャ NOVA を利用する。NOVA とは能町正治氏 (現 大阪大学教授) が開発した、複数のソフトウェア間でデータを共有するフレームワークである (図 5.9)。NOVA によりデータ収集と FITS ファイル生成を分離することができ、処理の柔軟性が向上する。

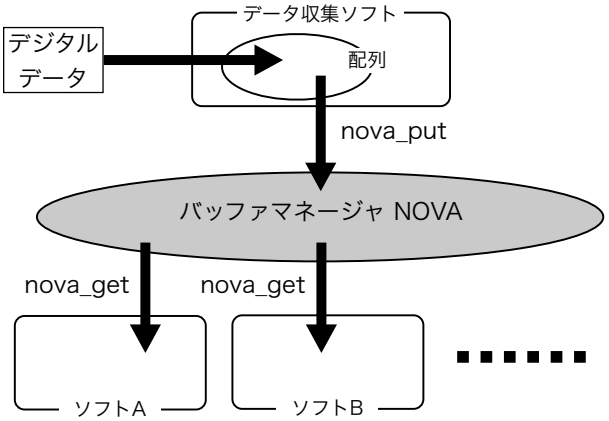

図 5.9: NOVA の概念図。データ収集を担うソフトが NOVA へデータを送り、ソフト A、ソフト B では NOVA に流れてきたデータを利用した処理を行う。FITS ファイル生成ソフトは ソフト A、ソフト B に対応する。現在のところ nova_get 関数を使うソフトウェアは FITS ファイル作成ソフト一つだけであるが、他の処理を並行して行う場合など複数のソフトを同時に走らせることができる。

NOVA を利用した収集データの加工手法は次の通りである。ユーザーはまず必要なバッファの容量と個数を指定して、バッファマネージャを立ち上げる。本研究では、2 MB のデータを 4 KB ずつ読み出すので、余裕を持たせて 10 KB のバッファを 500 個用意する。データ収集ソフトでは取得したデータを NOVA に送る。FITS ファイル作成ソフトは NOVA からデータを受け取り、5.4.2 節 に記したライブラリを利用して FITS ファイルを作成する。NOVA へのデータ渡し、及びデータ受け取りは NOVA ライブラリ関数 (nova_put, nova_get) を用いる。NOVA からデータを受け取る側は複数のソフトを同時に走らせることができる。そのため、ソフトウェア間で同期を取らずに同じデータに対し複数通りの処理を行うことが原理的に可能である。SXI BBM では現在のところ FITS ファイル作成ソフトのみを開発している。

5.4.4　ファイル化作成ソフト “nova2fits” の構築

以上の既存技術を組み合わせ、DE I/F から収集したデータを FITS 形式のファイルとして POSIX OS コンピュータに保存するソフトウェア “nova2fits” を構築した。nova2fits は常にバッファへのデータ入力がないかどうか監視し、unsigned int 型の配列へ逐一データを詰める。1 フレームあたりの画素数に対応するデータ量まで達したら、配列から FITS ファイルを一つ生成しディスクに保存する。扱う CCD 素子によって 1 フレームあたりの画素数が異なるためフレームの先頭と末尾の判定が必要になるが、この機能は 5.5 節 で言及することにする。また FITS 形式では 1 つの FITS ファイルに対し複数のデータ配列 (primary 及び extension arrays) を格納することができる。nova2fits で生成される FITS ファイルには extension 0 に 12 bit の波高値を、extension 1 に上位 4 bit の PCODE をそれぞれ格納している。

動作チェックとして、write コマンドで DE I/F の SpW FPGA SDRAM にあるパターンの値を書きこみ、書き込んだ領域を読み出して nova2fits で生成されるイメージファイルと書きこみ値を比較した。 nova2fits で得られた書きこみ値 (16 bit) のイメージを図 5.10 に示す。イメージファイルで出力された値と書きこみ値はフレーム全体で一致していた。

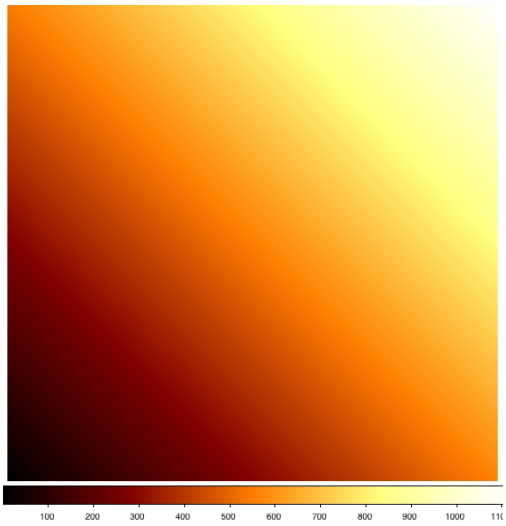

図 5.10: nova2fits の動作検証で生成された FITS イメージを ds9 ビューワで表示させた結果。write コマンドを利用して、座標 (x, y) に対し $x + y - 1$ という値を DE I/F の SpW FPGA SDRAM に書き込んだ。値は全ての画素において書きこみ値と一致した。

5.5 PCODE を利用したデータ収集

DE I/F には、Sequencer からピクセル種別情報 (PCODE) が供給される。いつどのような PCODE を与えるのかは Sequencer の User FPGA のロジックで定義する。以下、穴吹製ロジック (5.1.4 節) の動作を検証し、PCODE に対応したイメージファイルの作成を実現した。

5.5.1 PCODE の検証 (1) エンディアン

穴吹製 Sequencer ロジックでは、図 5.11 のように PCODE を与えている。画像 1 枚あたり over clocked ピクセルを含め水平 640 × 垂直 650 画素としている。RMAP 通信とその取得データのファイル化は、それぞれ別々のソフトウェアで行うためエンディアンの整合性をとらなければならない。

前節で作成した nova2fits では最終的にビッグエンディアンとして扱い、PCODE に対応する上位 4 bit を切り取って波高値イメージを作成している。NOVA からデータを受け取る際、nova2fits では i 番目の画素の値を 1 byte ずつ unsigned char 型の配列 $(N[2i], N[2i+1])$ に詰めている。これを unsigned int 型の値 $V[i]$ に直す際、もとのデータがビッグエンディアンであれば

$$V[i] = N[2i] \times 0\text{x}100 + N[2i+1] \tag{5.2}$$

とすれば良いが、デシメーションフィルタ処理後のデータがリトルエンディアンである場合は

$$V[i] = N[2i+1] \times 0\text{x}100 + N[2i] \tag{5.3}$$

とする必要がある。

そこで、デシメーションフィルタ機能を経て SDRAM に保存されたデータのエンディアンを調べるため、以下のような検証を行った。ビデオボードから DE I/F へのリアルな信号や擬似信号など一切入力せずに DE I/F のデシメーションフィルタ機能をスタートさせ、SpW FPGA 側 SDRAM に格納されたデータのそれぞれどのビットに PCODE があるかを調べた。信号入力のない状態でデシメーションフィルタを稼働させた場合、波高値に対応する 12 bit 値は特に意味を持たない。

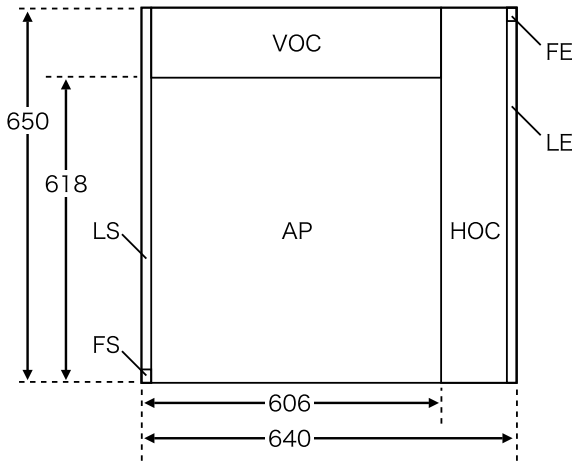

図 5.11: 標準的な Sequencer ロジックが DE I/F へ与える 1 フレームあたりの PCODE。図の左と下の数値は画素数を表す。

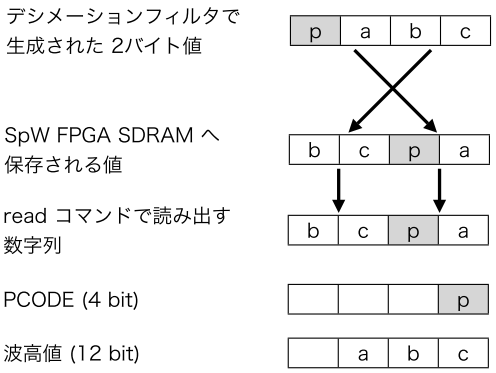

図 5.12: デジタルデータ収集系でのエンディアンの関係。p, a, b, c は各々 4 bit 幅をもつ値とする。read コマンドで読み出した時点では下位側に PCODE が含まれている。

メモリ領域のうち数画素分の 2 byte 値を比較したところ、PCODE は下位から数えて 5–8 bit にあり、デシメーションフィルタ後のデータはリトルエンディアンになっていることがわかった。従って、nova2fits で unsigned int 型に変換する際は 式 (5.3) のような計算をし、データ収集系全体では図 5.12 のように扱えば整合性が取れる。

5.5.2　PCODE の検証 (2) 得られる PCODE の実際

次に、SDRAM に蓄積されたデータが Sequencer ロジックで定義している通りの PCODE 配列に矛盾なくなっているか検証をした。方法としてここまでで構築した nova2fits を用いて、SDRAM の保存領域 (1024×1024 画素分) の PCODE を表示させた。

結果は 図 5.13 の通りである。この図では 640×1638 画素に変更して表示している。図より明らかなとおり、保存領域の先頭は必ずしも PCODE が FS にはならない。つまり、デシメーションフィルタ開始と FS は同期しておらず、結果的にデシメーションフィルタの開始はフレームの先頭と無関

係になってしまっている。

また、行の先頭の 2 画素が FS や LS, AP ではなく IA として処理されるケースが確認された (視認しにくいが図 5.13 では中央部)。この現象の周期性は確認できず、いつどのようなタイミングで、あるいはどのような状況下で IA として処理されるのかははっきりしていない。このままではフレームごとに検出される各 PCODE 種別の画素数が一致せず、PCODE を監視しながらイメージファイルを正しく作成することができなくなってしまう。そのため、暫定的対処として該当する 2 列は IA として Sequencer ロジックで定義し、3 列目を FS または LS とすることとした。改修後のロジックで定義されている PCODE の配置は図 5.14 の通りである。このロジック変更を加えた結果、PCODE 種別ごとの画素数は狂うことなく安定している。

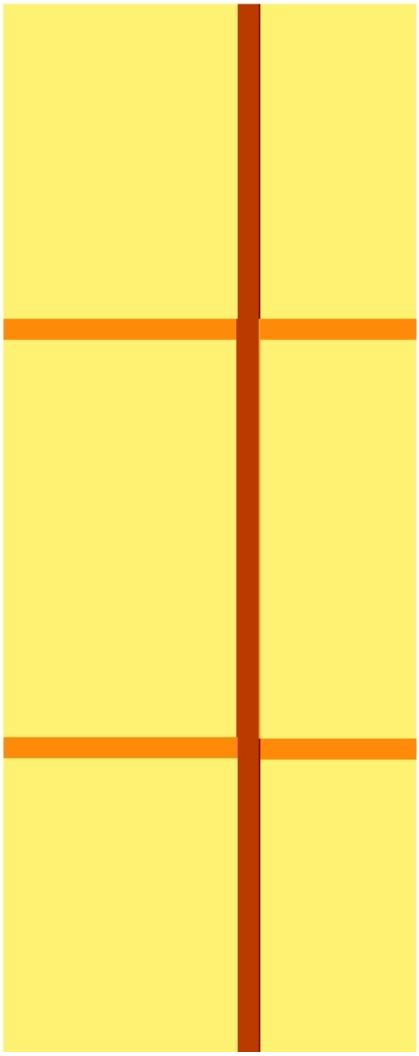

図 5.13: Sequencer ロジックで PCODE を生成し DE I/F のデシメーションフィルタを動作させたとき SDRAM に保存されたデータから PCODE のみを切り取ったイメージ。Sequencer からは 1 フレームあたり 640×650 画素として PCODE を供給しており、このイメージは RMAP の read コマンドにより SDRAM の保存容量である 1024×1024 画素分を表示している。中央縦に延びている茶色の帯が HOC、横に 2 本延びるオレンジ色の帯が VOC、黄色で示されているところの大部分が AP に対応している。厳密には VOC の縦帯の右端に FE もしくは LE があるが、表示している倍率では視認できない。読み出しは SDRAM 保存領域の先頭から順に行っている。そのため、保存領域の先頭が FS になっていないのがはっきりわかる。また Sequencer ロジックでの PCODE の定義から HOC のすぐ右隣が FS もしくは LS になるはずであるが、中央部では IA になっている。

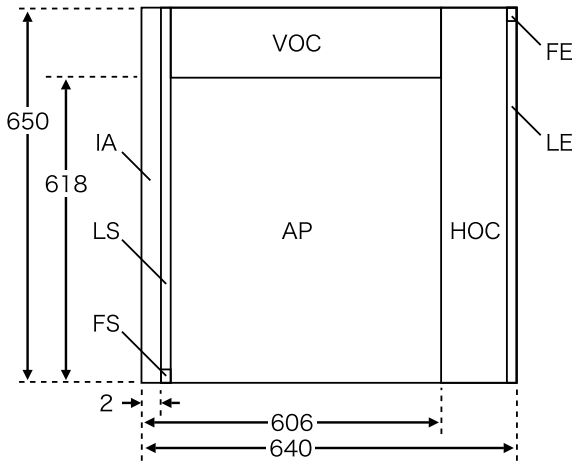

図 5.14: Sequencer ロジックが DE I/F へ与える 1 フレームあたりの PCODE (ロジック改修後)。
図 5.11 との違いは、行の先頭 2 画素を IA とし、LS および FS を 2 列右へずらしたことである。

5.5.3 nova2fits の PCODE 判定機能拡張

5.4.4 節 では NOVA を用いた FITS ファイル生成システムを構築したが、この時点では PCODE に依らず収集したデータを順番に並べただけのイメージファイルが生成される。そのため、PCODE に則ってフレームの区切りに対応したイメージファイルを生成するようにしなければならない。

そこで、PCODE 判定を行う機能を nova2fits に加えた。sxiSpWdaq で PCODE 判定を行うのもソリューションの一つであるが、どちらが適切かは 第 7 章 で議論することにする。前節で述べたように、フレームの先頭の列は FS や LS ではなく IA としている。現状では FS や LS をモニタすると 2 列分ずれたイメージが作成されてしまうことになるため、LE, FE をモニタする。LE から次の LE までを 1 行あたりの画素数、LE と FE の数を 1 フレームあたりの行数とし、FE を検出したらイメージファイルとして出力するようにした。これにより、nova2fits のソースコード内で縦横の画素数を指定することなく、利用する CCD 素子 (厳密には Sequencer ロジック) に合った画素数の FITS ファイルを生成することができるようになった。デシメーションフィルタを動作させ、SpW FPGA SDRAM に格納されたデータを収集し nova2fits でイメージ化すると、PCODE の extension では 図 5.15 のような期待通りのイメージになった。

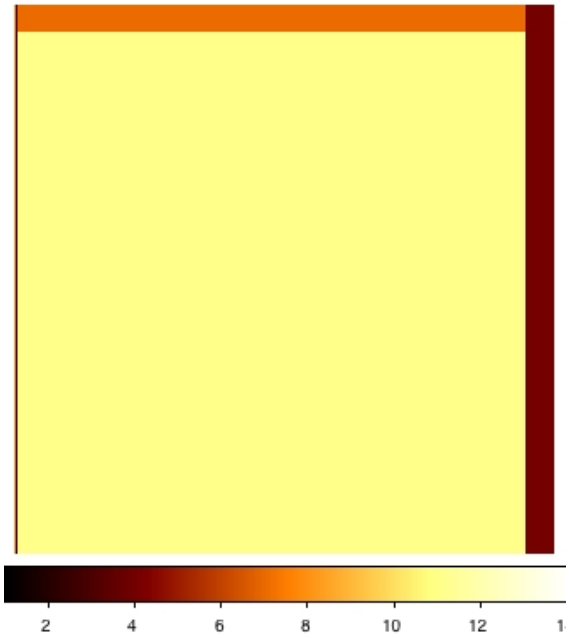

図 5.15: nova2fits に PCODE 判定機能を加えたときの PCODE イメージ。図 5.13 とは違い、フレームの先頭から末端までを適切に取り出している。図 5.15 で施したロジック改修の通り 1 列目と 2 列目が IA、3 列目が FS または LS となっている。

5.6　SXI データ収集ソフト “sxiSpWdaq” の構築

これまでに個別に対処してきた RMAP 通信を利用した処理を一つのソフトウェアとして整理再編し、sxiSpWdaq と命名した。これは 5.2 節で述べたデシメーションフィルタ機能のスタート、ステータスの監視、データの読み出しを繰り返し行うものである。

実際にこのプロセスを走らせた際、ステータスの監視途中でソフトウェアが待ちの状態になることがしばしば起きた。これはステータスレジスタへアクセスする際に、デシメーションフィルタ機能で生成された 2 byte 値のメモリ保存と何らかの原因で衝突し、DE I/F からリプライが返ってこなくなったと考えられる。対処としてステータスの監視を廃止し、デシメーションフィルタ機能をスタートさせてから終了するまでの典型的な時間 ($\sim$ 13 秒) ソフトウェアを待機させてからデータ収集を開始するように修正した。その結果、ソフトウェアが待ち状態になる現象は見られなくなり、動作がスムーズになった。

以上の変更を考慮すると、sxiSpWdaq の流れ図の最終形は図 5.16 のようになる。

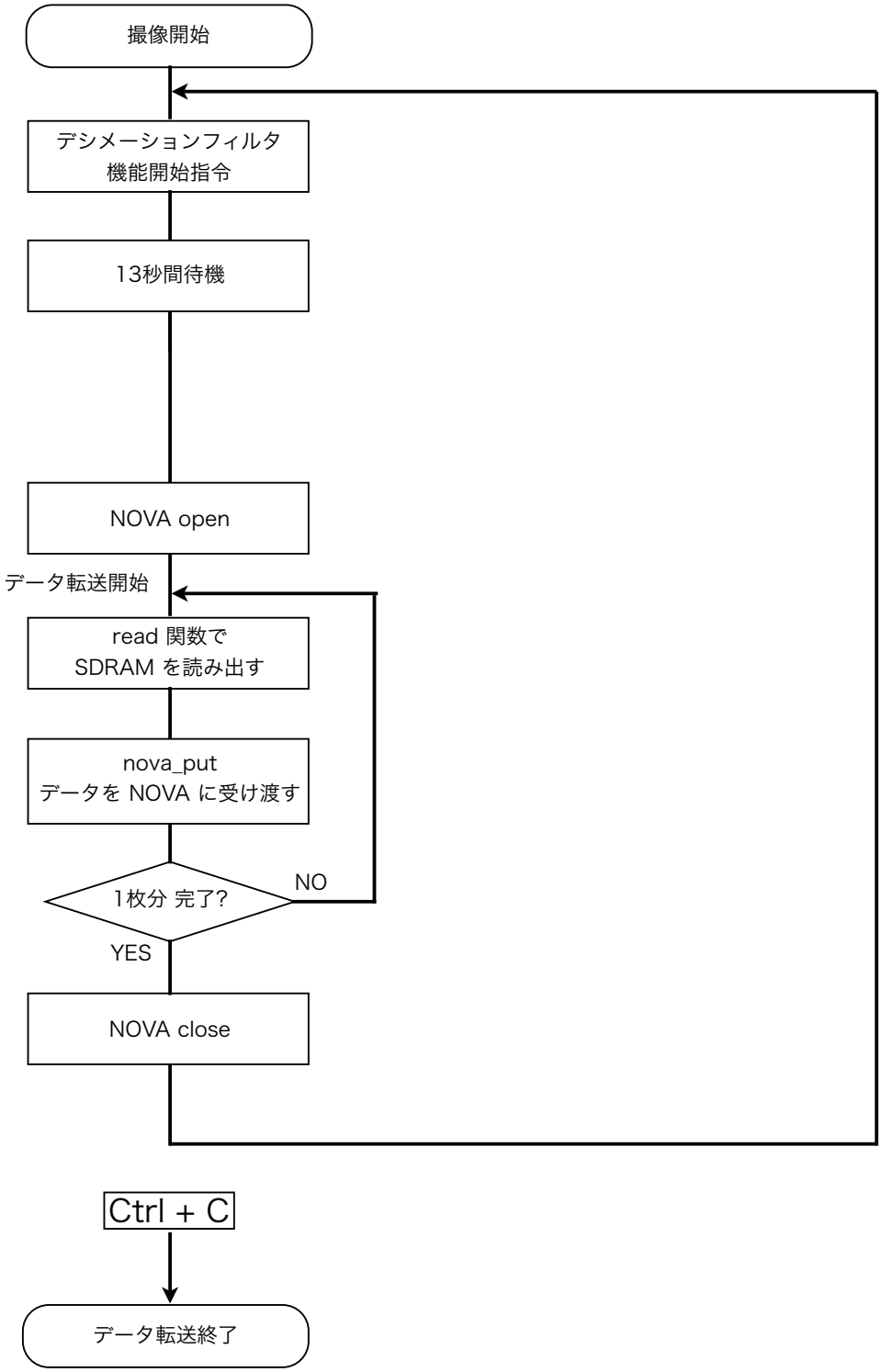

図 5.16: 完成したデータ収集ソフトのフローチャート。構想段階の 図 5.7 との違いは、デシメーションフィルタのステータスレジスタ監視を行わず、1024 × 1024 画素分の処理に必要な典型的時間に渡って待機してからデータ収集を開始するようにした点である。

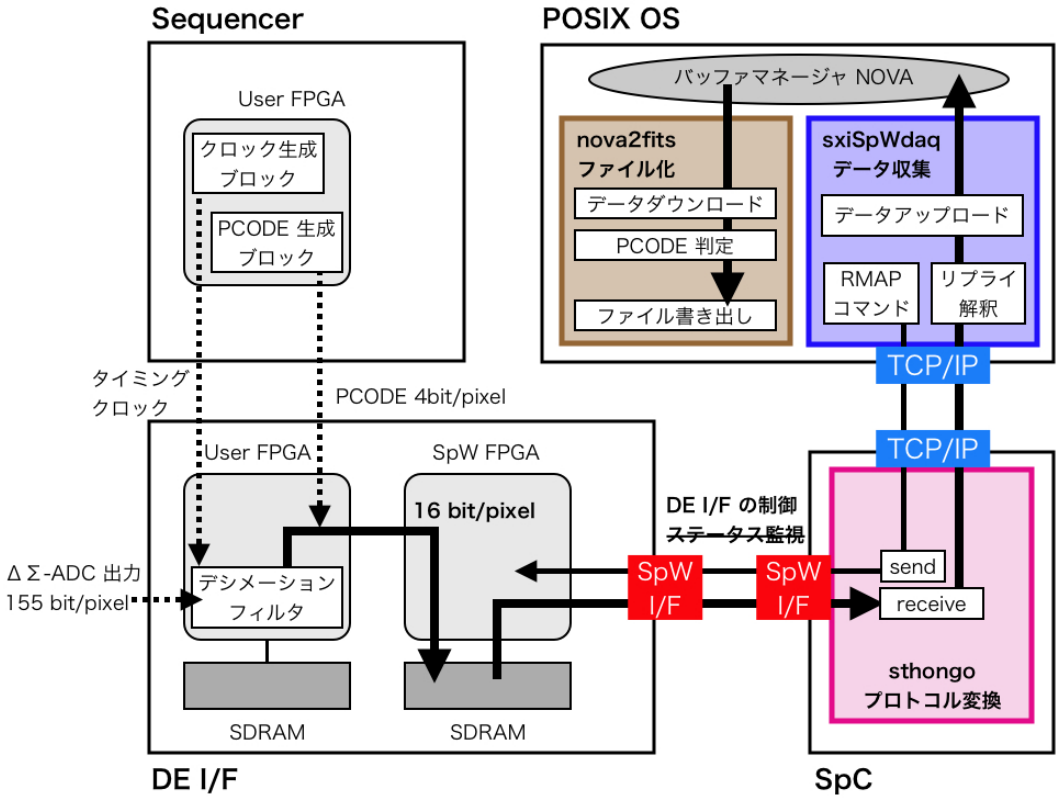

図 5.17: 完成したデータ収集系の全体図。データ収集ソフトは POSIX OS で動作させ、SpaceCube ではプロトコルを透過的に変換する。データ収集ソフトが行う DE I/F の制御としては、ステータス監視を行わずデシメーションフィルタの開始とデータ読み出しのコマンドを送るのみとなっている。

5.7　第 5 章のまとめ

SXI BBM を用いて、RMAP/SpaceWire 通信と NOVA によって ΔΣ 型 AD 変換後のデジタルデータを収集しイメージファイルとして保存するシステムを構築した。最終的なデジタルデータ収集系の全体図は 図 5.17 のようになる。構想段階 (図 5.6) との差異として、SpaceCube をプロトコルの変換器として使っている点と、デシメーションフィルタのステータス監視を行っていない点が挙げられる。前者はデータ転送速度の向上のため、後者は DE I/F の User FPGA における処理の衝突を回避するための措置である。NOVA へのデータアップロードに関しても、当初は Ethernet をまたいで行う方針であったが、sxiSpWdaq は POSIX OS で動作するソフトとなり、完成形では POSIX OS 内で完結している。

SpaceWire の通信試験では SDRAM への読み書きを意図した通りに行うことができ、長時間の連続動作実証により 24 時間以上挙動が安定していることを確認した。一方、5.3.3 節で述べた通り、SpaceCube をプロトコル変換器として使った場合のデータ転送速度は 4.4 Mbps を記録した。下流の nova2fits と組み合わせても速度はほとんど変わらず、SpaceWire 通信への影響はなかった。

第6章　SXI BBM の性能評価

前章では、SXI BBM を使って CCD のデジタルデータを収集するシステムを完成させた。一方、アナログ回路の開発はデジタル回路と独立に行われてきた。そこでまず JAXA 宇宙科学研究本部が導入したアナログ基板の動作検証を行った。次に、SXI BBM 全体を利用し CCD データを end-to-end で取得するシステムを整備し、撮像試験を行った。

6.1　アナログ回路の動作検証

6.1.1　Driver Board

ドライバーボードには DA コンバータと高速アナログスイッチが搭載されており、Sequencer から基準クロックの供給と DAC 設定を行うことで CCD 駆動に必要な信号を出力している。DA コンバータの出力が Sequencer からの DAC 電圧設定の通りであることと、CCD へ供給する駆動信号が定格通りの電圧であることの二点を満たせばドライバーボードの動作は正常と言える。そこで、前章で構築したシステムにドライバーボードを接続し、Sequencer から DAC 設定及びクロック供給を行い、ドライバーボード各部の電圧値を調べた。

まず DA コンバータ出力の予想値と測定値を 表 6.1 にまとめた。ドライバーボードには DA コンバータ AD5308 が二つ搭載されており、回路図では U35、U37 と名付けられている。いずれの DA コンバータ出力とも、部品定数公差の範囲内で予想値と一致している。

次に、ドライバーボード上にあるテストポイントで予想される電圧を、DA コンバータ出力をもとにして計算し見積った。そして、実際にテストポイントで信号電圧を測定し、両者を比較した。結果は 表 6.2 の通りである。こちらも予想値から大きくずれる信号は確認されず、ドライバーボードの出力は正常である。

なお、Head 基板で測定した信号電圧及び波形を 付録 B に示す。

6.1.2　Video Board

ビデオボードではアナログ信号を 155 bit のシリアル信号へ処理している。AD 変換は DE I/F とまたがって行われているが、最終的にデシメーションフィルタで出力される 12 bit の波高値が CCD 波形の signal level と floating level の電位差と比例関係になるよう作られている。そのため、動作検証として CCD の出力波形を模擬し、signal level と floating level の電位差を何通りか変えて供給し、構築したデジタルデータ収集系を利用して得られる波高値と電位差の線形性をチェックすればよい。セットアップは 図 6.1 の通りである。

Sequencer で生成される RG (Reset Gate: 1 画素分の信号の開始を表すパルス) をファンクションジェネレータに入力し、CCD 出力の模擬波形 (100 kHz、振幅は ±20 mV の範囲で可変) を作る。ビデオボードにはテスト信号入力用の lemo コネクタが用意されており、模擬波形はここから供給する。模擬波形は 図 6.2 のようになっている。

表 6.1: DA コンバータ出力の予想値と測定値

	ピン名称	信号名称	予想値 (V)	測定値 (V)
U35	V_{OUTA}	DVIHi	3.29	3.29
	V_{OUTB}	DVILo	3.02	3.01
	V_{OUTC}	DVSHi	3.29	3.28
	V_{OUTD}	DVSLo	3.02	3.01
	V_{OUTE}	DHHi	1.35	1.38
	V_{OUTF}	DHLo	0.35	0.32
	V_{OUTG}	DTGHi	3.29	3.28
	V_{OUTH}	DTGLo	3.02	3.03
U37	V_{OUTA}	DRGHi	2.68	2.69
	V_{OUTB}	DRGLo	1.93	1.96
	V_{OUTC}	DSGHi	1.02	1.03
	V_{OUTD}	DSGLo	3.02	3.01
	V_{OUTE}	DBB	0.00	0.00
	V_{OUTF}	DOG	1.17	1.15
	V_{OUTG}	DRD	1.66	1.68
	V_{OUTH}	DOD	2.85	2.84

結果は 図 6.3 の通りである。ASIC では奇数番目の画素 (odd) と偶数番目の画素 (even) を別々に処理しているため、このように切片のずれが生じる。横軸方向の両端を除いて概ね線形的な関係となっており、動作は適切であると考えられる。

表 6.2: ドライバーボードのテストポイントでの出力の予想値と測定値

テストポイント番号	信号名称	予想値 (V)	測定値 (V)
1	TILo	-8.99	-9.07
2	TIHi	0.14	0.17
3	TILoG	-2.57	-2.52
4	TIHiG	-6.32	-6.53
5	TSLo	-9.00	-8.94
6	TSLoG	-2.54	-2.49
7	TSHiG	-6.28	-6.28
8	TSHi	0.17	0.18
9	TP12Hi	5.87	6.00
10	TP12Lo	-0.93	-1.04
11	TTGHi	0.17	0.20
12	TTGLo	-9.06	-9.07
13	TRGHi	1.94	2.01
14	TRGLo	-5.85	-5.81
15	TSGHi	6.92	6.94
16	TSGLo	-9.00	-9.00
17	TBB	0.00	0.58
18	(OD)	24.0	23.0
19	TOG	3.16	3.25
20	T3.3	3.30	3.28
21	(RD)	14.2	14.0

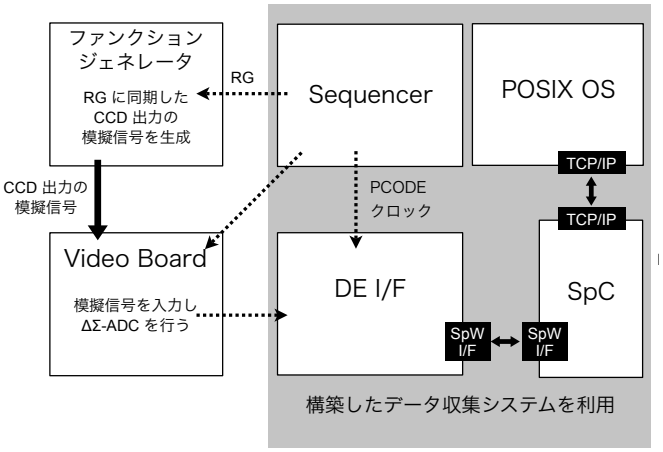

図 6.1: ビデオボード動作検証時のセットアップ。RG のパルスに同期した矩形波をファンクションジェネレータで作り、これを CCD 出力の模擬信号とする。ビデオボードからの ΔΣ-ADC 出力を DE I/F に供給し、第 5 章 で構築したデータ収集システムを使って FITS イメージを生成する。波高値が矩形波の振幅に比例しているかどうかを確認する。

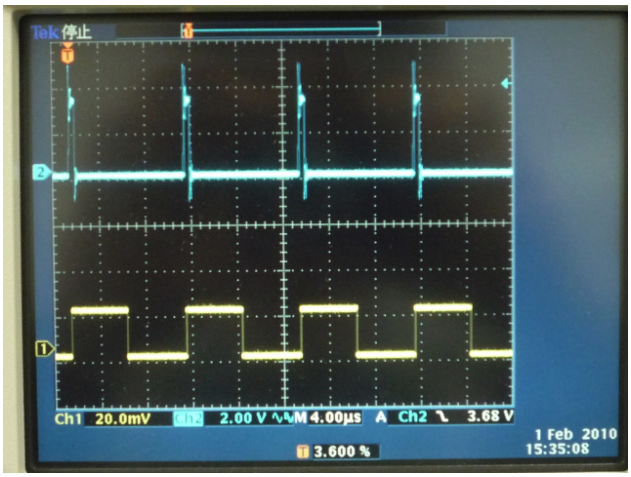

図 6.2: CCD 出力模擬信号の例。青は RG、黄色がファンクションジェネレータで作った CCD 出力の模擬信号である。このときの模擬信号の電位差は 20 mV としている。

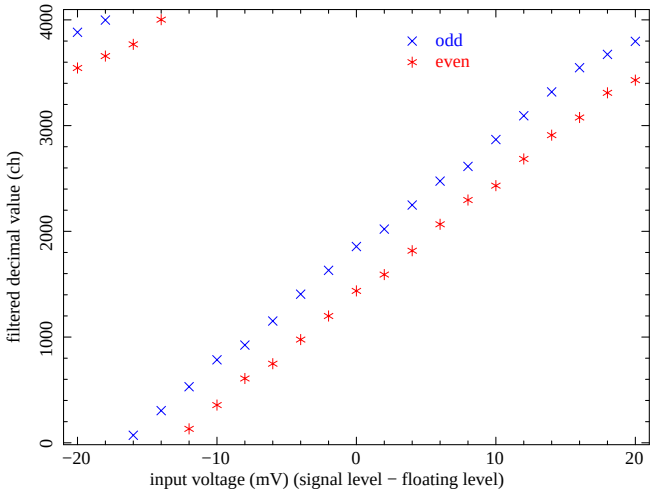

図 6.3: CCD 出力の模擬信号に対する応答。横軸はビデオボードに入力した信号の電位差、縦軸は FITS イメージで得られた波高値の平均値である。

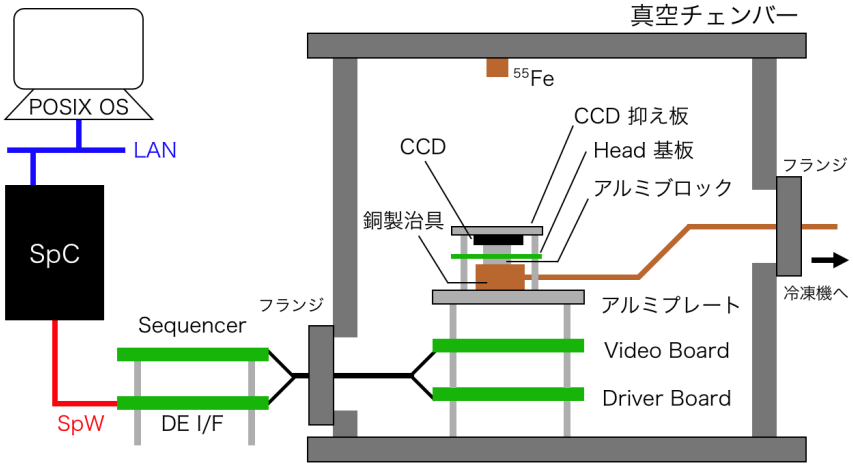

図 6.4: 撮像実験全体のセットアップ

6.2 撮像試験のセットアップ

CCD は、シリコンのバンドギャップ (∼ 1 eV) を熱エネルギーにより乗り越えた電子による暗電流がバックグラウンドとして検出する。これは冷却することで低下させることが可能である。そのため、保有する設備を組み合わせて CCD を冷やすシステムを整備した (図 6.4)。結露防止のため、CCD 素子及び冷却ヘッドは真空槽内に配置する。またアナログ信号のケーブル配線で発生する誘導によるノイズを極力少なくするため、2 枚のアナログ回路 (ビデオボード、ドライバーボード) も真空槽内に置く。

6.2.1 真空系および照射線源

既存の真空槽とダイアフラムポンプとターボ分子ポンプを使う。真空槽内部にあるアナログ基板の電源供給と各種信号の出入力のために、D-sub シールコネクタを溶接したフランジを新造した。真空計には、PFEIFFER 製 PKR251 を使う。これは真空度によってコールドカソードとピラニゲージを自動的に切り替えて測定するタイプの真空計である。真空槽内に基板を収納した状態で、真空引き開始からおよそ 3 時間で 10^{-5} Torr に到達する。

照射線源には 2009 年 9 月の時点で 700 kBq の ^{55}Fe を使用した。パッケージは直径 6 mm 程度のねじのような形状で、真空条件で使用してもパッケージにダメージがない構造になっている。線源は真空槽のふたに貼り付ける。CCD が検出すると予想される特性 X 線は、Mn-Kα (5.9 keV) と Mn-Kβ (6.5 keV) である。

6.2.2 冷却系

冷凍機は堂谷研究室が所有している東京理科器械製 CCA-1111 を利用する。これは冷却水循環型で、被冷却物との間で冷媒を循環させる。そのため CCD の直近まで冷媒を循環させる経路が必要であり、銅製の治具 (図 6.5) を製作した。これは厚さ 1 cm の銅板の内部に冷媒の通り道を掘り、出入口に銅パイプを溶接したものである。冷凍機は冷媒を最低 −20 °C まで冷却する能力をもつ。冷媒にはナイブライン (アルコール不凍液) を使う。ナイブラインは濃度 60% に希釈して用いる (濃度 60%

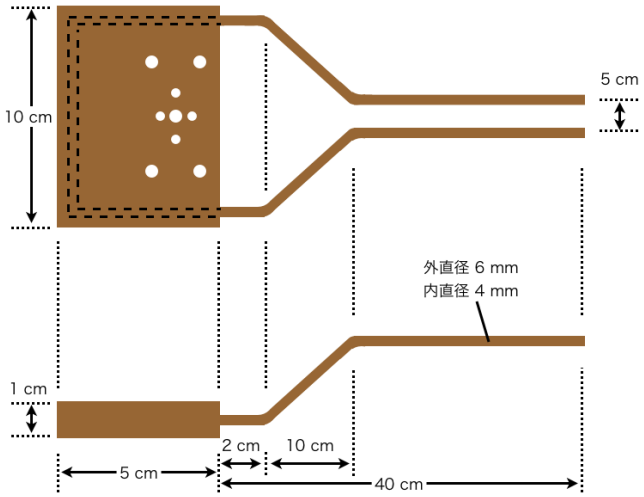

図 6.5: 銅製治具の構造の概観

のときの凍結温度はおよそ −30 °C である)。冷凍機は大気中に置き、銅製治具を利用することで冷媒と CCD 素子を熱的に接触させる。

温度測定には Pt 1000 白金抵抗体を用いる。較正実験により、温度 T (°C) と抵抗値 R (Ω) の関係は

$$T = \frac{R - 999}{3.74} \tag{6.1}$$

であることがわかっている (付録 C 参照)。白金温度計は 2 つ用意し、銅製治具とアルミブロック (図 6.4 参照) の 2ヶ所で温度をモニタする。

冷却試験の結果、銅製治具とアルミブロックはほとんど温度差がなく、アルミブロックは冷却開始から 1 時間で −17 °C に冷却できることがわかった。CCD 素子のパッケージとアルミブロックの熱接触を良くするために、接触面に放熱シリコーンを塗布しており、CCD 素子は −15 °C 程度になると推定される。

冷却システムをセットした状態の真空槽内部の写真を図 6.6 に示す。

6.2.3　ASIC プリアンプオフセット値の最適化

SXI BBM における ΔΣ 型 AD 変換で、線形性が保たれている入力レンジは ±200 mV である。そのため ΔΣ モジュレータへ信号を入力する時点で signal level と floating level の電位差を ±200 mV 以内におさめなければならない。5.1.2 節 で述べたように、ビデオボード上の ASIC のプリアンプには signal level に対しオフセット電圧を与える機能がある。さらに、ビデオボードには ASIC とは独立に CCD 出力をモニタする増幅率 9.8 倍の回路があり、この出力波形をモニタしながら最適なオフセット値を選ぶことでチューニングが可能である。

実際、何も照射していない時 −15 °C では増幅回路の出力が電位差 440 mV あった。そのため、撮像試験では 576 mV のオフセット電圧を与えることとした。この結果、ASIC のプリアンプ出力では floating level よりも signal level の電位の方が高くなり、電位差は −80 mV になった。

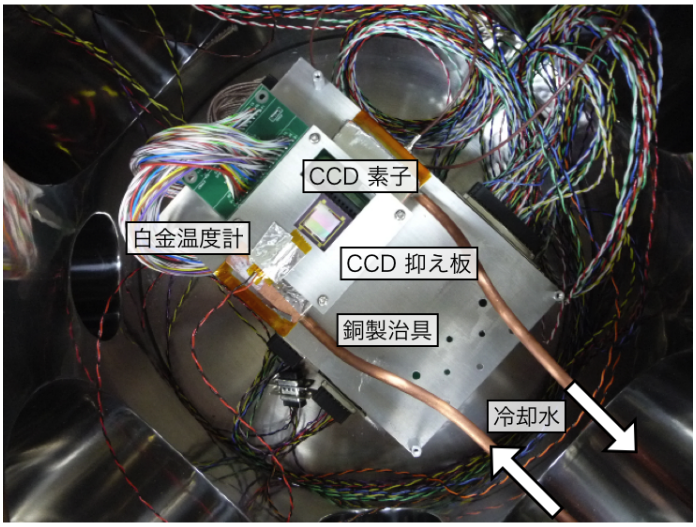

図 6.6: 真空槽内の写真。死角で見えないが銅製治具の上にアルミブロックが接触しており、アルミブロックの上に CCD 素子を配置している。CCD 素子は上から抑え板を使ってさらに熱接触を高めるようにしている。銅製治具のアルミブロック接触面以外は、熱輻射を防ぐためアルミテープを全体に巻き付けている。アナログ回路は紙面に対し奥の方向へ段重ねしているため写真には写っていない。

6.3 撮像試験の結果

回路周辺において以上のような準備を行い、低暗電流下での撮像を試みた。

6.3.1 イメージ

CCD 素子を −15 °C に冷却し、^{55}Fe を照射して露光時間約 4.2 秒のイメージデータを 75 枚取得した。75 枚のうち 1 枚のイメージを 図 6.7 に掲載する。縦縞模様は、奇数番目の画素と偶数番目の画素の違いである。SXI では奇数番目 (odd) と偶数番目 (even) で AD 変換を別々の回路系統で行っており、6.1.2 節 で述べたオフセットの違いがこのように縦縞となって現れる。素子全面一様に波高値の高い画素が散在しており、これが X 線イベントと思われる。複数枚のイメージに渡って同じ画素で波高値が高くなっているケースは見られず、ホットピクセルはないと考えられる。

6.3.2 スペクトル

次に、取得したイメージファイルからスペクトルを作成する。

6.3.2.1 解析手法

得られたデータは波高値が書かれた FITS ファイルである。スペクトルを得るためにダークイメージを作成し、取得したイメージからダークを差し引いてイベント抽出を行う。イベントは 2.4.1 節 で述べた Grade に従って分類する。AD 変換は odd と even に分かれているため、イベント抽出を行った後のデータハンドリングは偶数画素と奇数画素別々に行う。

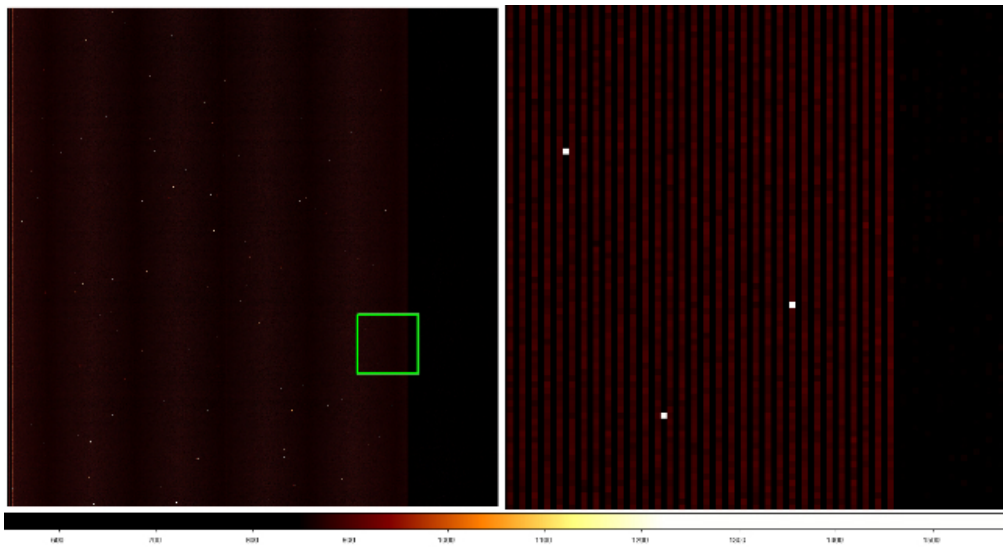

図 6.7: 波高値の生イメージ。左は素子全面を表示し、緑色の枠の範囲を拡大したものを右に表示している。白く表示された画素に X 線が入射していると推測される。縦の縞模様は odd と even に分けて ΔΣ 型 AD 変換を行っていることに起因するオフセットの違いである。

6.3.1 節 で述べたように、イメージには odd と even の縦縞が現れている。ところが、PCODE はずれていないものの、オフセットの大小関係が入れ替わっているイメージが不特定多数にわたり確認された。つまり、予期せぬタイミングで対応関係が入れ替わり、奇数番目の画素が even モジューレータで、偶数番目の画素が odd モジューレータでそれぞれ処理されてしまっていたのだ。

対応関係が正しいものとそうでないものが混在していると適切なダークを作成することができず、イベント候補抽出が行えないため、図 6.8 に示した手順でスペクトル作成及び解析を行う。まず対応関係がずれていないなもの (oddhigh) と、odd と even が入れ替わったもの (oddlow) の二つに FITS ファイルを分類する。次にそれぞれイベント抽出を行う。最終的に ASIC のモジュレータごとのスペクトルを作成するため、oddhigh の奇数座標のイベントと oddlow の偶数座標のイベントをたし合わせて odd モジュレータ系統のスペクトルとし、反対に oddhigh の偶数座標のイベントと oddlow の奇数座標のイベントをたし合わせて even モジュレータ系統のスペクトルとする。本章では取得したデータからシングルピクセルイベントを抽出することに集中し、問題点の考察は次章で行うこととする。

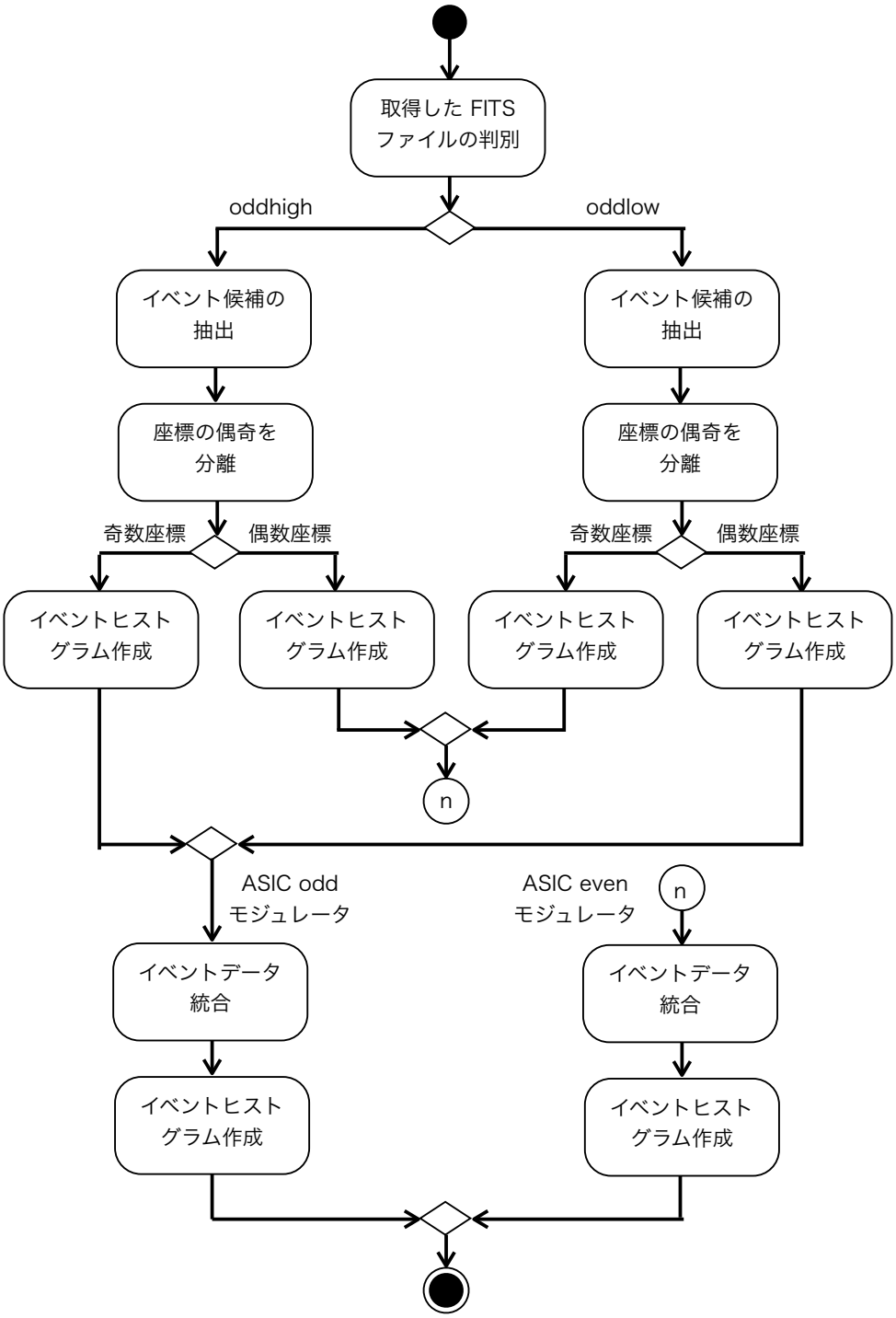

図 6.8: スペクトル解析のアクティビティー図。イベント抽出後のヒストグラムは Grade 0 のみを扱う。

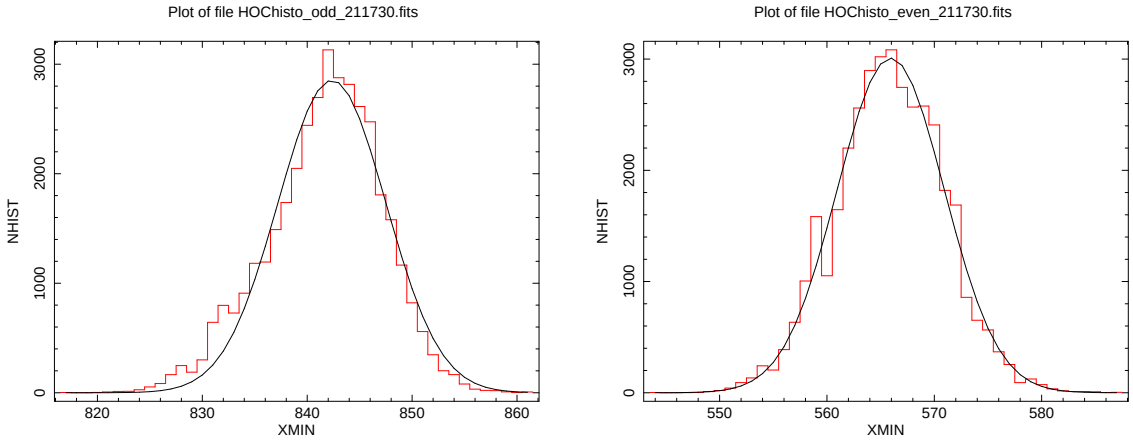

図 6.9: HOC のヒストグラム。横軸は波高値のチャネル数である。左は奇数座標 (odd モジュレータに対応)、右は偶数座標 (even モジュレータに対応) である。

表 6.3: HOC ヒストグラムのフィッティング結果

	中心値 (ch)	標準偏差 (ch)	Normalization
奇数座標	565.9	5.0	3009.0
偶数座標	842.4	5.2	2853.5

6.3.2.2　Split threshold の計算

イベント抽出を行うにあたって、Split threshold と Event threthold の値を決定しなければならない。Split threshold にはゼロレベルのゆらぎを用いるので、HOC を正規分布で最小二乗法フィットすればよい。

75 枚のうちある 1 枚について、odd と even 別々に HOC 領域での波高値ヒストグラムを作成した。これらを正規分布でフィットすると図 6.9 及び 表 6.3 のようになった。Split threshold の値には標準偏差の 4 倍程度の値 20 ADU を用いる。また、Event threshold は 80 ADU とする。

6.3.2.3　イベント抽出

oddhigh と oddlow それぞれについて、Grade 判定法に基づきイベント抽出を行った。抽出されたイベントのうち、Grade 0 のヒストグラムを作成した (図 6.10 及び 図 6.11)。いずれも 600 ch 付近に Mn Kα、660 ch 付近に Mn Kβ の輝線と思われるピークが検出されている。各ピークを正規分布で最小二乗法フィットすると、最確値は 表 6.4 のようになった。

6.3.2.4　イベント抽出結果の ASIC モジュレータ系統ごとへの統合

前節で作成した奇数座標、偶数座標ごとのヒストグラムを、

1. oddhigh 奇数座標 + oddlow 偶数座標 = odd モジュレータ
2. oddhigh 偶数座標 + oddlow 奇数座標 = even モジュレータ

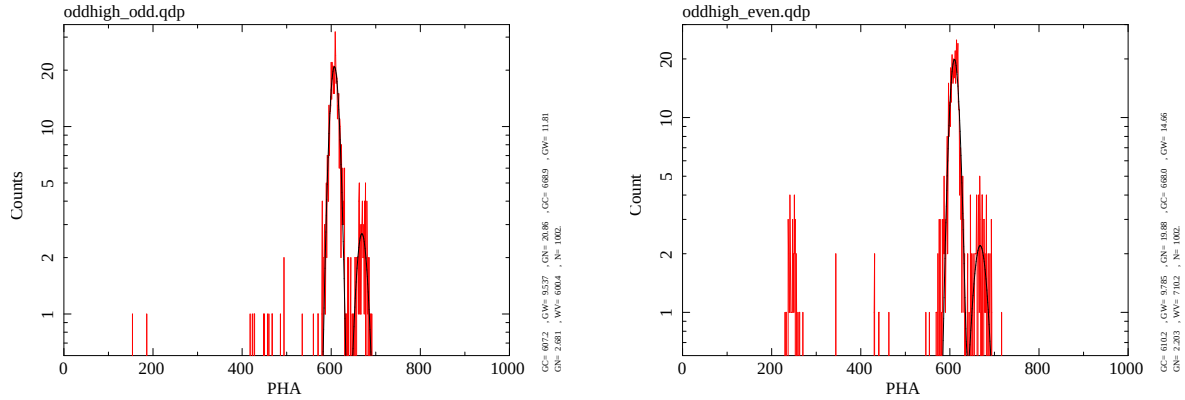

図 6.10: oddhigh の Grade 0 ヒストグラム。左は奇数座標、右は偶数座標のヒストグラムである。

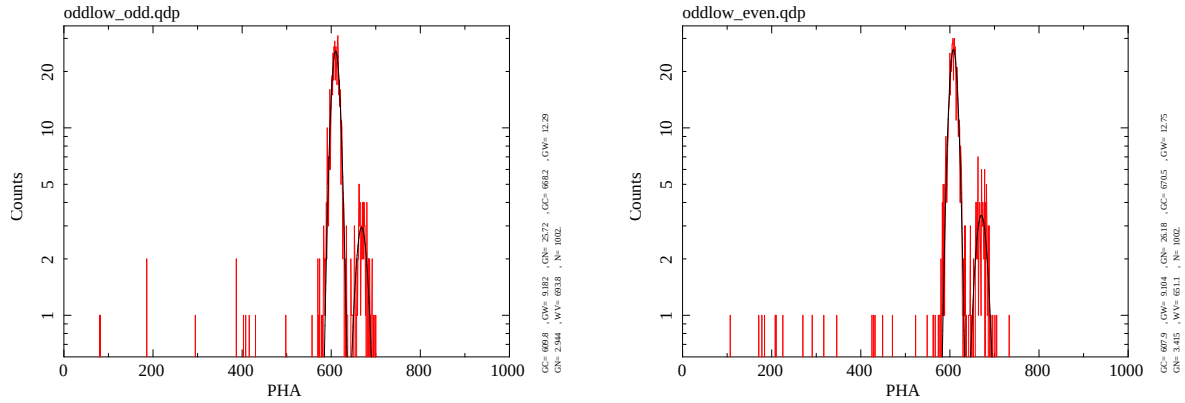

図 6.11: oddlow の Grade 0 ヒストグラム。左は奇数座標、右は偶数座標のヒストグラムである。

のように足し合わせ、ビデオボードの ASIC の odd/even モジュレータごとに対応するよう結果を統合する。ヒストグラムは 図 6.12 のように、二つのピークを正規分布でフィッティング結果は表 6.5 のようになった。

6.4 SXI BBM システムの性能

- ゲイン G (eV/ch)
  ここでは、チャネル一つ (ADC 出力一段階) あたりのエネルギーのことをゲインと呼ぶ。輝線のエネルギーを前節で得たスペクトルのピーク位置で割ればよい。

$$G = \frac{E\ (\mathrm{eV})}{\text{中心値}\ (\mathrm{ch})} \tag{6.2}$$

  Mn Kα での値を用いて計算すると、odd モジュレータ、even モジュレータとも $G = 9.7$ eV/ch となった。

- エネルギー分解能 ΔE (eV)

表 6.4: Grade 0 のヒストグラムのフィッティング結果

		Mn Kα			Mn Kβ		
		中心値	標準偏差	Norm	中心値	標準偏差	Norm
oddhigh	奇数座標	607.2	9.5	20.9	668.9	11.8	2.7
	偶数座標	610.2	9.8	19.9	668.0	14.7	2.2
oddlow	奇数座標	609.8	9.2	25.7	668.2	12.3	2.9
	偶数座標	607.9	9.1	26.1	670.5	12.8	3.4

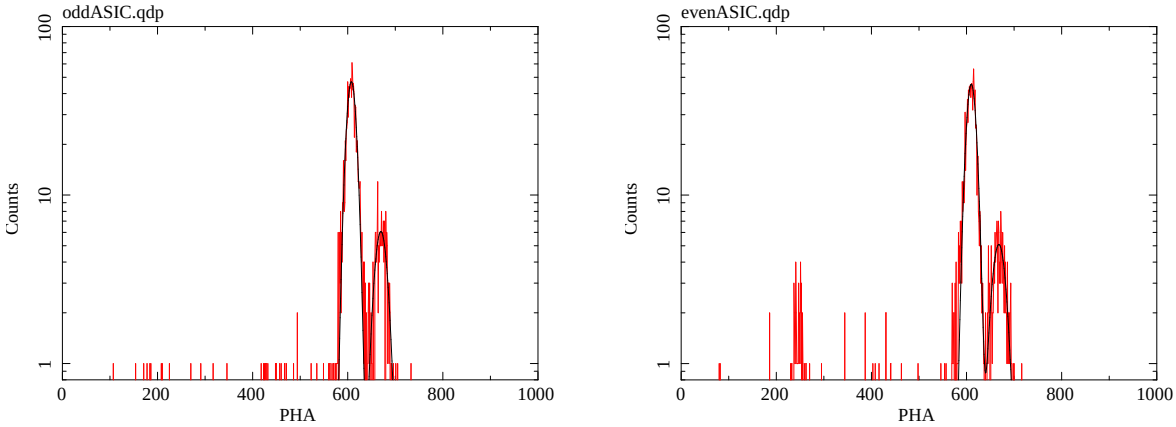

図 6.12: ASIC モジュレータごとの Grade 0 のヒストグラム。左は odd モジュレータ、右は even モジュレータである。

Mn Kα の標準偏差 (σ) を使って 5.9 keV でのエネルギー分解能 (FWHM) を求める。上で求めたゲインを用いて、

$$\Delta E = 2.35 \times G \times \sigma \tag{6.3}$$

で得られる。計算の結果、odd モジュレータでは ΔE = 211 eV、even モジュレータでは ΔE = 215 eV となった。

6.5　第 6 章 のまとめ

本章ではアナログ回路の動作検証を行い、構築したデジタルデータ収集システムと組み合わせて X 線 CCD の撮像試験を行った。

ドライバーボードに関しては、生成する駆動信号が定格通りであることを確認した。ビデオボードに関しては、ファンクションジェネレータを使って CCD のアナログ出力を矩形波として模擬し、ビデオボードに入力した。矩形波の振幅を 2 mV ずつ変えて約 20 通り入力し、デシメーションフィルタ通過後の波高値と入力振幅が比例関係となっていることを確認した。

撮像に向けて、真空系と冷却系を整備した。これらを使って −15°C 程度まで CCD 素子を冷却することが可能となった。^{55}Fe 線源を使って素子に X 線を照射し、一連のシステムを利用して撮像を行ったところ X 線イベントの撮影に成功した。その一方で $\Delta\Sigma$ 型 AD 変換の odd/even モジュレー

表 6.5: ASIC のモジュレータごとに統合したヒストグラムのフィッティング結果

	Mn Kα			Mn Kβ		
	中心値	標準偏差	Norm	中心値	標準偏差	Norm
odd モジュレータ	607.2	9.3	47.0	669.7	12.4	6.1
even モジュレータ	610.0	9.5	45.5	668.1	13.5	5.1

タと、画面上の偶数/奇数座標の対応関係が入れ替わっていることが判明し、イベント抽出にあたって取得した FITS ファイルの選別を行い対処しなければならないことがわかった。イベント候補抽出後のスペクトル解析の結果、5.9 keV でのエネルギー分解能 (FWHM) は 211 eV (odd モジュレータ)、215 eV (even モジュレータ) であることがわかった。

第7章　議論

第 5 章 では SXI BBM を使ったデジタルデータ収集系を構築した。また 第 6 章 ではアナログ回路も組み合わせ、CCD を −15°C に冷却し ^{55}Fe を用いて X 線撮像試験を行った。ここでは、現在得られている性能と問題点を考察していく。

7.1　デジタルデータ収集系の性能と問題点

7.1.1　データ転送速度

データ転送速度は 1 パケットあたり 6 KB の読み出し時に 4.4 Mbps を記録している。これは SXI での要求性能 (8.8 Mbps) を満たしていない。原因として、SpaceCube で行っているプロトコル変換が律速していると考えられる。プロトコル変換ソフトではパケットを 1 バイトずつ解釈しており、TCP/IP では SpaceWire で必要なヘッダの一部がないためその付け加えや切り取りを行っている。一連の処理は OS 搭載のプロトコルスタックの性能に左右され、使用したハードウェアセットでは最大限の速度に到達していると考えられる。

搭載用の CPU ボード SpaceCard ではパケットの処理を FPGA でハード処理する仕様になっており、改善が期待される。SXI BBM を利用して素子性能などの地上評価を行う場合、現在の転送速度はデータ収集の足かせとなるほど遅いわけではないため大きな損害は発生しない。

7.1.2　データ収集ソフト sxiSpWdaq の問題点

DE I/F では、1 フレームあたり 1024 × 1024 画素のデータをダブルバッファで一時保持可能なメモリ容量が用意されている。しかしながら、保存されている画素データの順番が見通しよくわかり確実にデータを取得できるのを第一目標として開発を進めてきたため、バッファは 1 フレーム分のみの使用に留めてきた。

デシメーションフィルタの開始と Sequencer ロジックの開始がずれているため、SDRAM に保存される画素データはフレームの先頭 (FS) にならず先頭・末尾でイメージファイルを適切に区切る必要があるが、これは nova2fits で PCODE を監視することで実現している。ダブルバッファ処理を行う場合においても、PCODE 監視によって 1 フレーム目の末尾と 2 フレーム目の先頭で区切ることが原理的に可能である。

撮像試験では、75 枚のデータを取得するのに 15 分かかっていた。ダブルバッファ化によって、15 分の間に 2 倍の 150 枚程度収集できるようになると単純に推測される。使用目的や実験内容によって、少しでも多くの画像を効率よく収集する必要が出てきた場合、sxiSpWdaq のダブルバッファ化改良が必要となる。

7.1.3 PCODE 判定機能

PCODE の判定は nova2fits で行っている。sxiSpWdaq も C++ 言語で作成されているため、原理的にはこちらで PCODE 判定を行うことも可能である。現状は sxiSpWdaq に「RMAP でデータ収集を行い NOVA に渡す」機能のみをもたせ、画像ファイル化などの機能を nova2fits に集約した。これにより RMAP で取得したデータをそのままポインタで NOVA に渡すことができるため、データ収集システムを見通しよく開発することができた。

しかし NOVA からデータを取得するソフトが複数走るようになる場合、PCODE 判定を sxiSpWdaq で一括して行う方が良いと考えられる。同じ PCODE 判定処理を複数のソフトで並行して行うよりも、上流で予め PCODE 判定をするとデータを扱いやすくなる。FITS ファイル作成ソフト以外には、例えば取得したデータを逐一ディスプレイに表示するソフト[1]があると、取得したイメージファイルをほぼリアルタイムで目視できる。これにより、照射ビーム位置の調整や試験の途中経過をモニタすることができる。

このような処理を行うソフトウェアを追加で開発する場合、PCODE 判定機能を sxiSpWdaq へ移植する必要がある。

7.1.4 DE I/F の問題点

データ収集系の開発と撮像試験から、DE I/F には二つの問題点があることがわかった。

一つ目として、デシメーションフィルタの処理そのものとステータスレジスタの監視のための RMAP/SpaceWire 通信が両立できず、sxiSpWdaq が停止することがあった。これは User FPGA もしくは SpW FPGA のロジックのどちらかに何らかの不具合があり、処理が衝突してしまっているためと考えられる。

また、二つ目として ASIC の odd/even モジュレータの順序とイメージの水平座標の偶奇との対応関係が、フレームによって反転する問題があった。DE I/F の PCODE 処理機能はダブルバッファになっており、どちらに PCODE を取り込むかは Sequencer からの Clamp 信号 (signal level の直前でのみ high レベルになる) の立ち下がりで切り替えている。DE I/F の挙動を精査している大阪大学の穴吹直久氏によると、この Clamp 信号の与え方次第で odd と even の対応が入れ替わる可能性があると考えられる。例えば、縦転送を 1 回行う間に Clamp 信号も一度 high になるが、その間に読み出されてしまう信号は素子に存在しない画素 (つまり PCODE は IA となる) になる。Clamp でポインタを切り替えてしまったため、次に読み出す行先頭 (FS もしくは LS) は偶数系統のポインタへ処理され、結果として誤った対応づけとなって現れる。ほかにも、デシメーションフィルタの処理が終了してから再度処理を開始するまでの間に、何らかの理由でポインタがリセットされると同様に対応関係が崩れてしまう。

現状、これら二つの問題が重なり、6.3.2.1 節 で述べたような取得イメージの後処理を行わないと適切にイベントを抽出することができなくなっている。

7.2 SXI BBM システムの性能と問題点

SXI BBM 全体を組み合わせ、撮像装置として動作することを実証した。

[1] QL (Quick Look) ソフトと呼ぶことがある。

7.2.1 エネルギー分解能の考察

5.9 keV でのエネルギー分解能は 211 eV という結果が得られた。これは素子を −15°C に冷却したときの数字である。一概には比較できないが、エネルギー分解能としては SXI 搭載品の要求性能値 (−120°C で 150 eV 以下) より悪く、一方で 2007 年度まで堂谷研究室が X 線 CCD 実験に使用していたシステム (−17°C で 658 eV [33]) よりは良い。

エネルギー分解能が要求値に到達していない理由は大きく二つ考えられる。まず、現状の Sequencer ロジックでは signal level と floating level を 35 回ずつサンプリングする仕様になっている。signal level では 6.2.3 節 で述べたような電位調節を行っている。その際にアンダーシュートが発生しており、この間も signal level のサンプリングを行ってしまっている。これが原因で分解能が悪くなっていると考えられる。サンプリングタイミングの最適化が急務である。また二点目として、さらに低い温度まで冷却可能なシステムを整備すればエネルギー分解能が向上すると考えられる。熱励起により発生する電子は素子を冷却すればするほど減るためである。

7.2.2 撮像システム全般の今後の課題

搭載品開発に向けた取り組みをさらに押し進めるためには、以下のような今後の課題が考えられる。

前節で述べたように、エネルギー分解能の改善のためにさらに低い冷却温度を目指す必要がある。これは、将来的に機上を想定した地上試験などの際にも要求されることになる。例えば銅製治具にペルチェクーラーを装着すれば、さらに低い温度を実現することは可能である。だが、搭載要求と同じ −120 °C を目指す場合は機会式冷凍機や液体窒素を使った冷却系を使う必要がある。そうなると、導入する冷凍機形状に合わせて真空槽を新造しなくてはならない。

また、ビデオボードから下流では ΔΣ 型 AD 変換を 4 つのチャネルに分け並行して処理している。各々回路は独立であるため、エネルギー分解能も若干の差が生じてくると考えられる。少しでもエネルギー分解能を向上させたい場合、6.1.2 節 で述べたビデオボードの動作検証を各チャネルに対して行わなければならない。この結果から、線形性が最も優れているチャネルを使うと所有している回路が実現可能な最もよい性能を出せると考えられる。

第8章　まとめ

ASTRO-H 衛星に搭載する X 線 CCD カメラ (SXI) の回路プロトタイプである BBM を用いて、デジタルデータ収集系を構築した。SXI BBM は ASTRO-H で採用することが決まっている SpaceWire をベースとして作られており、これに既存の SpaceWire/RMAP ライブラリを応用してデジタルデータを収集するソフトウェア sxiSpWdaq を構築した。さらに、データバッファマネージャ NOVA を介し、イメージファイルとして保存するソフト nova2fits を整備した。

CCD の画素データを取得する流れは以下の通りである。CCD 出力波形はビデオボード上 ASIC での $\Delta\Sigma$ モジュレータによって 1 画素あたり 155 bit に変換され、DE I/F 上の User FPGA のデシメーションフィルタで 12 bit 値にたたみ込まれる。これに Sequencer からの 4 bit 値を上位に付与し、16 bit 値として SpW FPGA 側の SDRAM に保存する。SDRAM に格納されたデータを sxiSpWdaq が収集し、POSIX OS の NOVA へ送る。POSIX コンピュータでは、nova2fits が PCODE を監視しながら CCD 出力を最終的に FITS ファイルとして保存する。

さらに、構築したデータ収集系とアナログ系を組み合わせ、素子を -15°C に冷却し ^{55}Fe 線源を用いて撮像試験を行った。縦転送は止めずに常に読み出しを行い、露光時間およそ 4 秒のイメージを 75 枚取得し、Grade 判定法によりイベント抽出を行った。5.9 keV でのエネルギー分解能は 211 eV であることがわかった。

RMAP/SpaceWire 通信はデータ転送速度が 4.4 Mbps で、24 時間以上にわたり挙動は安定していた。転送速度は SXI の要求性能を満たしていないが、BBM を地上実験を行う上で足かせとなるほど遅いスピードではない。BBM では RMAP パケットの解釈などの処理をライブラリソフトウェアで行っているが、搭載品ではハードウェア処理するため速度は改善すると予想される。

また、DE I/F には FPGA ロジックの不具合が原因と思われる問題が二つ見つかった。そのため、当初想定していたデータ収集の手法を変更したり、イメージファイルの事後仕分けのような工夫をすることでデータ取得とスペクトル作成を実現した。

現状のシステムでさらにエネルギー分解能を向上させるためには、signal level の電位調節の際に生じるアンダーシュートを避けるようサンプリングタイミングを最適化しなければならない。タイミングは Sequencer ロジックで定義しており、アナログ波形に応じたクロックチューニングを行うことで改善が期待される。また、実験室の冷凍機の最低到達温度をさらに低くしたり、ビデオボードの動作評価を行って 4 つある $\Delta\Sigma$ 型 AD 変換のチャネルのうち最も性能の良いものを使うとエネルギー分解能が向上すると考えられる。

付 録A　rmaphongo の実行例

rmaphongo を用いて DE I/F SpW FPGA SDRAM にアクセスし、値を読み書きした時のコンソール出力を以下に示す。一部補足説明を “//” の右に記している。

```
[/SYS]% rmaphongo_0906                          // rmaphongo 20080906 版
Which SpaceWireIF implementation:
  Shimafuji IP Core          [2]
select > 2
SpaceWireIFSpaceCube1ShimafujiIPcore : initialize
spw0 opened
fpga ver. = 0x1000
SpaceWireIFSpaceCube1ShimafujiIPcore : open (0)
connecting ...
link0 on (0x0000003f)
status = 0x0000003f
connected.
SpaceWireIFSpaceCube1ShimafujiIPcore : connect (0)
###############################################
### SpaceWire sample program : rmaphongo ###
###           ver 2.1 (20080624)          ###
###                                       ###
###   This program is totaly based on     ###
###   SpaceWire/RMAP 'Hongo' Library.     ###
###############################################

Please set Destination information
Select :
 1 : Input new RMAP Destination
 2 : Reset to default RMAPDestination
 3 : Dump Current RMAP Destination
 4 : Return to the menu
 ### Frequently Used Settings ###
  10 : Old Shimafuji SpaceWire IF Boars
       (Logical Address=0x01, Draft E CRC)
  11 : Shimafuji SpaceWire IF Boars
       (Logical Address=0xFE, Draft E CRC)
  12 : Shimafuji SpaceWire IF Boars
       (Logical Address=0xFE, Draft F CRC)
  20 : SpaceWireRouter by NEC
  30 : SpaceWire Universal IO Board by MHI
>30                                  // ロジカルアドレス、Destination key, CRC などの設定

Source Logical Address is set to 0x31
Please ensure the connection between SpaceCube and Universal IO Board
RMAPDestination::dump() invoked
Destination
  Logical Address    : 33
  Path Address       : none
```

```
  Destination Key   : 10
  CRC Version       : Draft F
  Word Width        : 2bytes-1Word

Source
  Logical Address   : 31
  Path Address      : none
  Path Address Len. : 00

Menu :
  Read(2bytes)              [1]
  Write(2bytes)             [2]
  Read(general)             [3]
  Write(general)            [4]
  Receive a raw SpW packet  [5]
  Send a raw SpW packet     [6]
  Set Destination Info      [8]
  Toggle Debug Mode [Off]   [0]
  Quit                      [9]

select > select > 1
Read (2bytes)
address in hex > 2
Reading...done
Read result :
0000-0002 0000                                  // データ取り込み設定レジスタ 現在 FIFO

Menu :
  Read(2bytes)              [1]
  Write(2bytes)             [2]
  Read(general)             [3]
  Write(general)            [4]
  Receive a raw SpW packet  [5]
  Send a raw SpW packet     [6]
  Set Destination Info      [8]
  Toggle Debug Mode [Off]   [0]
  Quit                      [9]

select > 2
Write (2bytes)
address in hex > 2
data for 0000-0002 > 1                          // アドレス指定制御の規定値書きこみ
Writing...done

Menu :
  Read(2bytes)              [1]
  Write(2bytes)             [2]
  Read(general)             [3]
  Write(general)            [4]
  Receive a raw SpW packet  [5]
  Send a raw SpW packet     [6]
  Set Destination Info      [8]
  Toggle Debug Mode [Off]   [0]
  Quit                      [9]

select > 1
```

```
Read (2bytes)
address in hex > 2
Reading...done
Read result :
0000-0002 0001                                  // アドレス指定制御になった

Menu :
  Read(2bytes)              [1]
  Write(2bytes)             [2]
  Read(general)             [3]
  Write(general)            [4]
  Receive a raw SpW packet  [5]
  Send a raw SpW packet     [6]
  Set Destination Info      [8]
  Toggle Debug Mode [Off]   [0]
  Quit                      [9]

select > 1
Read (2bytes)
address in hex > 04000000
Reading...done
Read result :
0400-0000 33cc                          // SpW FPGA SDRAM のアドレス 0x04000000 の保存値

Menu :
  Read(2bytes)              [1]
  Write(2bytes)             [2]
  Read(general)             [3]
  Write(general)            [4]
  Receive a raw SpW packet  [5]
  Send a raw SpW packet     [6]
  Set Destination Info      [8]
  Toggle Debug Mode [Off]   [0]
  Quit                      [9]

select > 2
Write (2bytes)
address in hex > 04000000
data for 0400-0000 > 1234                       // 0x04000000 に 0x1234 を書き込む
Writing...done

Menu :
  Read(2bytes)              [1]
  Write(2bytes)             [2]
  Read(general)             [3]
  Write(general)            [4]
  Receive a raw SpW packet  [5]
  Send a raw SpW packet     [6]
  Set Destination Info      [8]
  Toggle Debug Mode [Off]   [0]
  Quit                      [9]

select > 1
Read (2bytes)
address in hex > 04000000
Reading...done
```

```
Read result :
0400-0000 1234                                  // 書き込んだ通りの値を読み出せた

Menu :
  Read(2bytes)              [1]
  Write(2bytes)             [2]
  Read(general)             [3]
  Write(general)            [4]
  Receive a raw SpW packet  [5]
  Send a raw SpW packet     [6]
  Set Destination Info      [8]
  Toggle Debug Mode [Off]   [0]
  Quit                      [9]

select > 9                                      // rmaphongo 終了
SpaceWireIFSpaceCube1ShimafujiIPcore : close (0)
[/SYS]%
```

付 録B　Head 基板駆動信号の波形

Head 基板上で CCD 駆動波形を測定したときの電圧と波形の写真を示す。

表 B.1: Head 基板上での駆動電圧

	定格値 (V)	実測値 (V)
RG (High/Low)	2.0 / –6.0	2.1 / –6.0
RD	14.0	14.0
OD	22.0	22.1
OG	3.0	3.2
SG (High/Low)	7.0 / –9.0	7.0 / –9.0
P2H (High/Low)	6.0 / –1.0	6.0 / –1.0
P1H (High/Low)	6.0 / –1.0	6.0 / –1.0
P2V (High/Low)	0.0 / –9.0	0.1 / –9.0
P1V (High/Low)	0.0 / –9.0	0.1 / –9.0

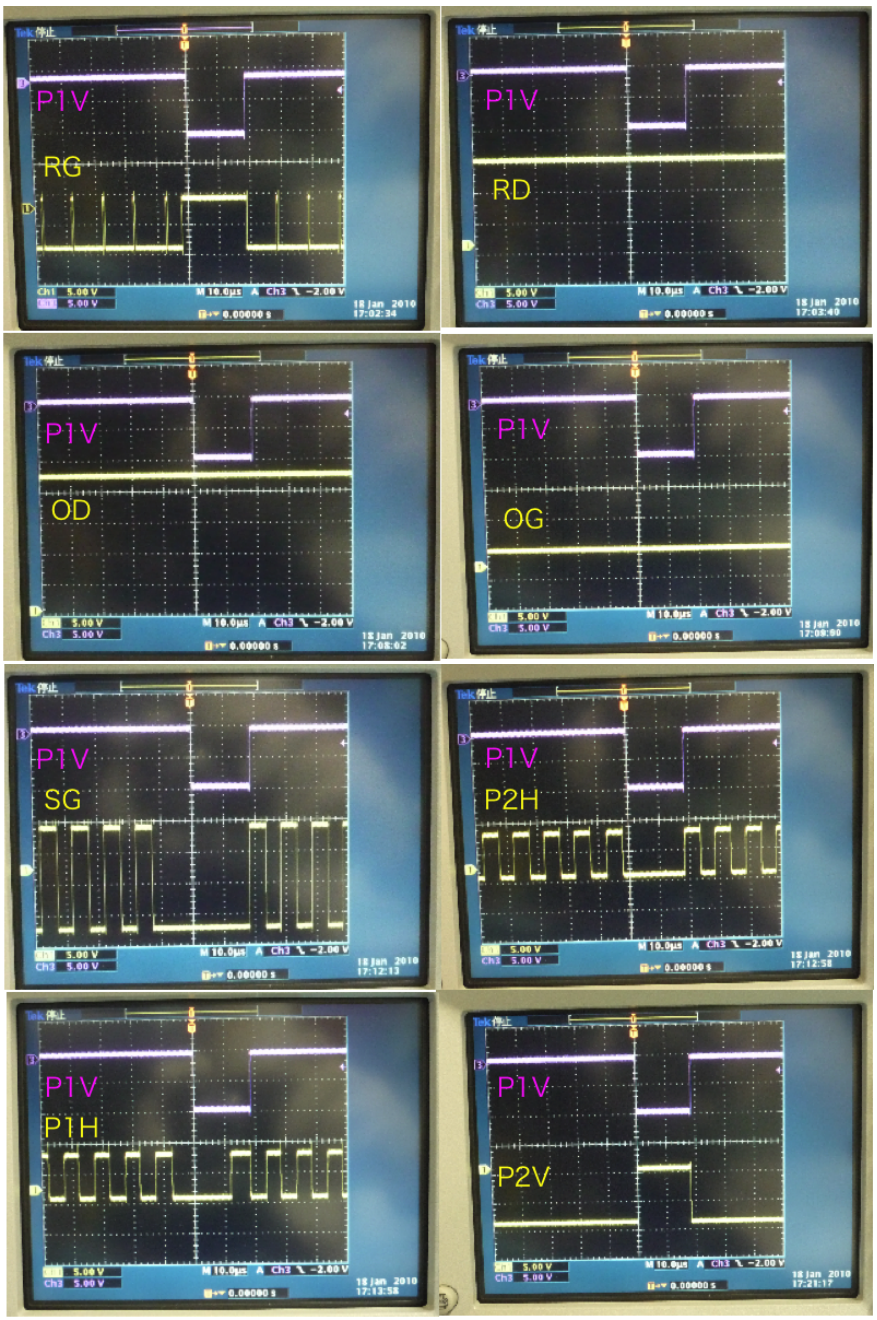

図 B.1: Head 基板上での駆動信号の波形。P1V にトリガをかけて計測している。

付 録C　白金抵抗温度計の較正

本実験では Pt 1000 白金抵抗体を 2 本について、温度較正を行った。以下、アルミブロックの温度モニタ用を白金抵抗 1、銅製治具の温度モニタ用を白金抵抗 2 と呼び分ける。

温度を 4 通り変化させ、抵抗値 R (Ω) をテスターで、温度 T (°C) を水銀温度計で測定し、一次関数

$$T = \alpha R + \beta \tag{C.1}$$

でフィットした。結果は 図 C.1 及び 表 C.1 の通りである。パラメータは誤差の範囲 (1σ) で一致しているため、平均してどちらの温度計とも

$$T = \frac{R - 999}{3.74} \tag{C.2}$$

で温度を求めることにする。

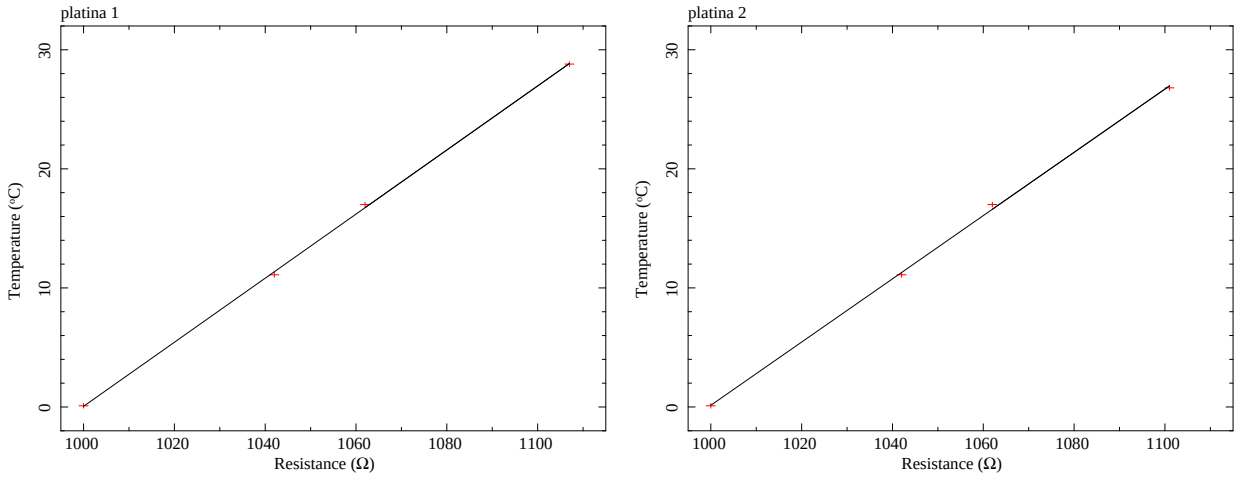

図 C.1: 白金抵抗温度計較正結果。左が白金抵抗 1、右が白金抵抗 2 である。

表 C.1: 白金抵抗温度計較正フィッティング結果

	α (°C/Ω)	β (°C)
白金抵抗 1	0.269 ± 0.004	-269 ± 4
白金抵抗 2	0.266 ± 0.005	-265 ± 4

Bibliography

[1] H. Kattunen, P. Kroger, H. Oja, M. Poutanen, K. J. Donner, 2006, Fundamental Astronomy (Springer), Chapter 3

[2] XCOM: Photon Cross Sections Database (http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html).

[3] Glenn F. Knoll 著, 木村逸郎、阪井英次訳, 「放射線計測ハンドブック 第 3 版」, 日刊工業新聞社 (2001).

[4] Institute of Space and Astronautical Science (ISAS/JAXA) and the X-ray Astrophysics Laboratory NASA/Goddard Space Flight Center, 「The Suzaku Tecnichal Discription, Anouncement of Opportunity #3」 (http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/doc/suzaku_td/)(October, 2007).

[5] 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究本部 データセンター, 「科学衛星 Astro-E2 実験計画書 (第 2 分冊)」(2005)

[6] High Energy Astrophysics Group at ISAS Japan (http://www.astro.isas.jaxa.jp/).

[7] 石川真之介, 修士論文「次世代宇宙硬 X 線・ガンマ線観測に向けた新しい電極構造による CdTe 半導体撮像検出器の開発」、東京大学 (2008)

[8] ASTRO-H 次期 X 線国際天文衛星 (http://astro-h.isas.jaxa.jp/index.html.ja)

[9] 狐塚正樹, 修士論文「X 線 CCD 検出器の宇宙環境におけるバックグラウンドの起源の解明」、東京大学 (2004)

[10] 穴田貴康、修士論文「すざく」搭載 X 線 CCD カメラのバックグラウンドの研究、東京大学 (2006)

[11] 高木慎一郎、修士論文「次期 X 線天文衛星塔載予定透過型 CCD 検出器の性能評価と冷却システムの研究」、京都大学 (2003)

[12] 「平成 4 年度 (1993 年) 第 2 次飛翔実験科学衛星 ASTRO-D 計画書」、宇宙科学研究所 (1993)

[13] 中本創、修士論文「次期 X 線天文衛星 NeXT 塔載に向けた大面積 X 線 CCD 素子の開発」大阪大学 (2008)

[14] Nakajima, H., Matsuura, D., Anabuki, N., Miyata, E., Tsunemi, H., Doty, J. P., Ikeda, H., Takashima, T., Katayama, H., IEEE Transactions on Nuclear Science Volume 56, Issue 3 (2009), 747

[15] 中嶋大 ほか、「CCD イメージセンサ高速処理用 ASIC MND02 取扱説明書」(2009)

[16] 鶴剛 ほか、「ASTRO-H 搭載用軟 X 線撮像検出器 SXI の開発 (1): カメラシステムの基本デザイン」、2009 年日本天文学会春季年会スライド

[17] SXI チーム、ASTRO-H PDR 資料 (2010)

[18] Ozaki, M., et al., 2009, in proc. “The Energetic Cosmos–from Suzaku to ASTRO-H”, 450

[19] 幸村孝由 ほか、「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の紫外線対策」、2009 年日本天文学会春季年会スライド

[20] Watanabe, T., et al., 2009. in proc. “The Energetic Cosmos–from Suzaku to ASTRO-H”, 418

[21] NeXT SXI Team, NeXT SXI SDR 資料 (2008)

[22] European Space Agency, ECSS-E-ST-50-11C Draft 1.3, “SpaceWire protocols”, 2008

[23] European Space Agency, ECSS-E-ST-50-12C, “SpaceWire – Links, nodes, routers and networks”, 2008

[24] 萩原利士成, 修士論文「撮像型 X 線 TES 型マイクロカロリメータのデジタル信号処理」, 東京大学 (2007)

[25] Yuasa, T., “Development of SpaceWire-based waveform-sampling pulse height analyzer and its application to a hard X-ray detector,” Master Thesis, The University of Tokyo (2008)

[26] 湯浅孝行、「SpaceWire/RMAP Library」http://www.astro.isas.ac.jp/SpaceWire/wiki/ (アクセス制限あり)

[27] 湯浅孝行、「SpaceWire Tutorial」http://www.astro.isas.ac.jp/SpaceWire/wiki/ (アクセス制限あり)

[28] 三菱重工業、「CCD 小型読み出し装置の設計作業成果報告書」JX-PSPC-238145-OA (2008)

[29] 浜松ホトニクス、「Nch mini w/Al CCD の主な仕様」(2008)

[30] 国立天文台 天文データセンター、「FITS の手引き 第 5.1 版」(2007)

[31] NASA Goddard Space Flight Center, “FITSIO Home Page”, http://heasarc.gsfc.nasa.gov/fitsio/

[32] NASA Goddard Space Flight Center, “CCfits: C++ Wrappers for the cfitsio library”, http://heasarc.gsfc.nasa.gov/fitsio/CCfits/

[33] 加藤菜々子、修士論文「宇宙用 X 線 CCD 検出器の低バックグラウンド化」東京工業大学 (2008)

謝辞

言葉では表し尽せないほど多くの方々にご指導、ご協力を頂き、本論文の完成に漕ぎつけました。ここに感謝の気持ちを述べさせていただきたいと思います。

指導教員の堂谷忠靖教授には常日頃から親切かつ丁寧に指導いただきました。多くの仕事を抱え忙しいときであっても、締切や発表などの予定に合わせて原稿やプレゼンをしっかりチェックし勘所を掴んだ言葉でフィードバックして下さり、私にとって大きな成長材料となりました。本論文の作成にあたっては特に「読み手のことを考えて表現する」ということを頻繁に指摘されました。今後は充分気を付けていこうと思っています。

尾崎正伸助教には、本研究で厚い壁にぶち当たったときに何度も助けられました。SpaceWire の通信がなかなか開通しなかったのが最大の山だったでしょうか。問題分割や解決への道筋を指南して下さったのはもちろんですが、前進する様子が見えず疲弊していた私に対し、「今の苦労は決して無駄にはなりませんから」と言葉をかけて下さり精神的な支えにもなりました。ほかにも言いたいことは山ほどありますが、本当にありがとうございました。

PD の馬場 (寺田) 彩さんには、SpaceCube を動かし始めるとき特に数多くのサポートをしていただきました。その後、「天体解析を始めたい」と半ばわがままな私の希望を聞き入れて下さり、時に厳しく、的確な指導をしていただきました。解析で学んだことがふと実験に結びつくこともよくあり、とてもいい機会をいただいたと思っています。ありがとうございました。

同期で総研大所属の松田桂子さんにもお世話になりました。実験では私より松田さんの方が Driver Board には詳しいため、回路でわからないところはよく質問し、私の理解の助け船になりました。それと、ふと気がつくと実験室がきれいに整理整頓されていることがよくあり、有言不実行の私とは対照的で感心しました。冷凍機が壊れて実験室が水浸しになったときも、文句一つ言わずに一緒に片付けてくれました。本当に感謝しています。

M1 の清水一真くんは、同室だったこともあり日頃から様々なことを語らいました。肝心の研究については、同じ実験グループにもかかわらずなかなか細かい作業をご一緒できず少し残念です。コンタミネーション物質の脱ガス測定は先行研究が少なく大変だと思いますが、困ったときはいつでも私に疑問をぶつけて下さい。必ずしも納得いく答えが出るとは限りませんが、どうかご理解下さい。

また、昨年度博士課程を修了した東大所属の穴田貴康さんにも、実験を始めたころ特にお世話になりました。博士論文で忙しいはずなのに、手をとめて私の質問に丁寧に答えて下さる姿を見て、私もこんな先輩にならなければと思わされました。D2 の広津敏尚さんには、私があまりよく把握していない東工大の情報を日頃から共有させていただきました。

実験を進める上で、大阪大学の穴吹直久さんには大変お世話になりました。初めてお会いするときまでは解像度の悪いテレビ会議ごしにしか姿を伺えず、声が低く少し恐い印象をもっていました。宇宙研の購入品目の選定を間違えたり、デッドラインまでにデータ収集ソフトを仕上げられず、リアルに怒られたらどうしようとびくびくしていました。実際は恐いオーラなどなく、私が疑問に思っていることやわからないことを納得いくまで熱心に教えて下さり、穴吹さんのおかげで幾多なる試練を乗り越えることができました。本論文に必要な開発や実験の大半を共に進めることができたことを非常にうれしく思っています。ありがとうございました。

SXI チームの皆様にも大変感謝しています。阪大常深研にはたびたびおじゃまさせていただきまし

た。常深博教授、林田清准教授、中嶋大助教には出張する度に実験の進捗状況を気にかけて下さり、日頃から有益な情報をいただきました。また、同期を中心に常深研学生の皆様にも、度重なる出張の際に励まされました。宮崎大の森浩二准教授と青山翔一くんには、苛酷な nova2fits のデバッグにお付き合い頂きました。あの苦労がなければこの論文は存在しません。工学院大、京大宇宙線研究室、理研、立教大の研究者や学生の皆様にも大小かかわらず様々なご協力をいただきました。ありがとうございました。

ほかにも、普段の活動の場として JAXA 宇宙研 X 線グループの同期 (齋藤慧くん、杉本宗一郎くん、古関優くん、佐藤拓郎くん)、スタッフのみなさま、所属するの学生 (東大、首都大、総研大) のみなさまには日頃から支えられてきました。海老沢研のみなさんとはよくお昼をご一緒させていただいていました。齋藤くんとはよくおやつを物々交換していました。

また東工大では、私と同じ JAXA 宇宙研に研究拠点をおいていた赤外線グループ松原研の和田健介くん、東工大河合研の戸泉貴裕くんなど大変多くの方々に日頃から支えられました。特に二人には、東工大の右も左もわからなかった私にとって貴重な指南役でした。

学部の卒業研究をさせていただいた金沢大学宇宙物理学研究室のみなさまとその他同期のみなさまには、大学院進学の際に私を温かく送り出して下さり、感謝しています。

家族にも感謝しています。大学院進学を承諾してくれた両親からは日頃から叱咤激励の言葉と生活面での助けを受け、励まされました。

また、「自分のやりたい道に進みなよ」と背中を押してくれた、私にとって大切な人へも感謝の意を表したいと思います。

修士課程の最後 2ヶ月間は、東工大のグローバル COE プロジェクト「ナノサイエンスを拓く量子物理学拠点」より支援を受けました。

ここに名前を掲載できなかった方も含め、みなさま本当にありがとうございました。

藤永 貴久
2010 年 2 月 12 日